

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL EN
FLEXION, ENTRE VIGAS REFORZADAS CON VARILLAS DE VIDRIO
FRENTE A LAS REFORZADAS CON ACERO”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

VILA CARBAJAL, EUCLIDES GLICERIO

ASESOR:

MG. TELLO MALPARTIDA, OMART DEMETRIO

JURADO:

Dr. CANCHO ZÚÑIGA GERARDO ENRIQUE

Ms. GARCIA URRUTIA OLAVARIA, ROQUE JESUS LEONARDO

Ms. TABORY MALPARTIDA GUSTAVO AUGUSTO

LIMA – PERÚ

2019

AGRADECIMIENTOS

Aprovechar este espacio para agradecer a mis padres: Glicerio Vila Vargas y Rufina Carbajal Rojas; por su apoyo incondicional en todo el tiempo de mi etapa universitaria, así mismo en desarrollo de este trabajo de investigación. Sin su apoyo hubiese sido difícil la culminación de ese trabajo.

A mis hermanas: Flora, Yesela y Miriam, por sus consejos y motivaciones para cumplir mis metas trazadas.

A mi asesor ing. Tello Malpartida, Omart Demetrio por su continuo apoyo y tutela. Sus enseñanzas, consejos y experiencias profesionales han hecho posible la realización de este trabajo de investigación.

A mis amigos que, en distintas formas directas e indirectas, apoyaron al desarrollo de este trabajo de investigación.

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres por su sacrificio y esfuerzo en darme una carrera para mi futuro, que lo considero la mejor herencia recibida.

A mis hermanas por su constante apoyo moral en mi vida universitaria y en la elaboración de este proyecto.

A mi querida facultad de ingeniería civil-UNFV donde me sentí muy acogido por mis compañeros de aula y profesores.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	1
DEDICATORIA	3
ÍNDICE GENERAL	4
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
1.1 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	13
1.1.1 Realidad problemática	13
1.1.2 Problema general y específico	14
Problema general.	14
Problemas específicos.	14
1.2 ANTECEDENTES	15
1.3 OBJETIVOS	29
1.3.1 Objetivo General.	29
1.3.2 Objetivos específicos.	29
1.4 JUSTIFICACIÓN	30
1.5 HIPÓTESIS	31
1.5.1 Hipótesis General.	31
1.5.2 Hipótesis Específicos.	31
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	32
2.1 BASES TEÓRICAS	32
2.1.1 Fibra de vidrio.	32
2.1.2 El acero.	41
2.2 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE LA INVESTIGACIÓN	51
2.3 EVALUACIÓN DEL CASO	54
2.3.1 Concreto.	54
2.3.2 Acero o GFRP	61
2.3.3 Diagrama momento curvatura.	62
2.3.4 Ductilidad	63
2.3.5 Deflexión de viga	64
CAPÍTULO III. METODO	66
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	66
3.2 ÁMBITO TEMPORAL Y ESPACIAL	66
3.3 VARIABLES	66
3.3.1 Variables independientes	66
3.3.2 Variables dependientes	67
3.4 MUESTRA Y POBLACIÓN	67
3.5 INSTRUMENTOS	67
3.6 FUENTE DE RECOLECCIÓN DE DATOS	67

3.7	PROCEDIMIENTO.....	68
3.8	ANÁLISIS DE DATOS.....	68
3.9	LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	68
CAPÍTULO IV. RESULTADOS		69
4.1	RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	69
4.1.1	Ductilidad de las vigas reforzados con acero, GFRP y GFRP-acero	76
4.1.2	Esfuerzo de compresión y tensión del concreto.....	77
4.1.3	Análisis de deflexión.....	81
4.1.4	Análisis de costo.....	92
4.2	PRUEBA DE HIPÓTESIS	95
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS		96
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES		98
CAPÍTULO VII. RECOMENDACIONES		100
CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS.....		101
CAPÍTULO IX. ANEXO		104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de Ensayo a tensión de GFRP de 6,8 y 12mm	17
Tabla 2. Datos de Ensayo a compresión de GFRP de 6,8 y 12mm	17
Tabla 3. Datos referentes a la adherencia entre el armado y el hormigón.....	21
Tabla 4. Características de los tipos de fibra de vidrio.....	33
Tabla 5. Características resistentes de los aceros de 40, 60 y 75.....	43
Tabla 6. Varillas corrugadas y sus características.	43
Tabla 7. Peso (Kg/m) Según el diámetro.....	44
Tabla 8. Diámetros del pin para la prueba de maleabilidad del acero.....	47
Tabla 9. Tensión de las barras de GFRP.....	51
Tabla 10. Características paramétricas de las barras GFRP (en mm).....	51
Tabla 11. Datos técnicos del concreto y del acero.....	69
Tabla 12. Resultados del análisis en flexión de viga reforzada con varilla de acero.	70
Tabla 13. Datos del concreto y del GFRP	71
Tabla 14. Resultados del análisis en flexión de viga doblemente reforzada con varilla de GFRP en tensión y compresión.	72
Tabla 15. Datos del concreto, GFRP y acero.....	73
Tabla 16. Resultados del análisis en flexión de viga reforzada con varilla de GFRP en compresión y acero en tensión.....	74
Tabla 17. Puntos de quiebre del momento-curvatura para la viga con diferentes refuerzos.	76
Tabla 18. Tabla de ductilidad de las vigas reforzadas.	76
Tabla 19. Tabla de esfuerzo del concreto de las vigas reforzadas.	79
Tabla 20. Resultados del análisis en deflexión de viga reforzada con varilla de GFRP-Acero.	83
Tabla 21. Resultados del análisis en deflexión de viga reforzada con varilla de GFRP. ...	86
Tabla 22. Resultados del análisis en deflexión de viga reforzada con varilla de GFRP-acero	89
Tabla 23. Resultados del análisis en flexión de viga doblemente reforzada.	90
Tabla 24. Tabla de fuerza deflexión de las vigas reforzadas.	91
Tabla 25. Precios de las varillas de GFRP en España.	92
Tabla 26. Precios de las varillas de GFRP en Shanxi Xin Shi Yu.....	93
Tabla 27. Precio de flete marítimo.	94
Tabla 28. Cotización de las varillas usadas en las vigas de nuestro análisis	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Resultados del diseño de viga continua de hormigón armada con acero.....	23
Figura 2. Costos totales de viga 30x30 reforzados con acero y PRFV en Cuba.	23
Figura 3. Proceso de pultrusión para la fabricación de los FRP con fibra de vidrio.	40
Figura 4. Curva esfuerzo-deformación y módulo de elasticidad del acero.	45
Figura 5. Diagrama del alto horno.....	50
Figura 6. Características geométricas de las vigas a investigar.....	52
Figura 7. Cortes transversales de las vigas doblemente reforzadas.....	53
Figura 8. Fórmula para determinar las fuerzas normales.	54
Figura 9. Fórmulas para deformaciones en el eje longitudinal.	54
Figura 10. Modelo para concreto confinado y no confinado.....	55
Figura 11. Curva esfuerzo - deformación del concreto a compresión.....	56
Figura 12. Fuerza de compresión del concreto.....	56
Figura 13. Curva esfuerzo - deformación a tensión del concreto.....	58
Figura 14. Fuerza de tensión del concreto.....	59
Figura 15. Aproximación de la curva esfuerzo - deformación del acero.	61
Figura 16. Esquema para determinar el momento de curvatura.....	63
Figura 17. Gráfico Momento-Curvatura de una sección transversal de concreto reforzado con acero.....	63
Figura 18. Gráfico de deflexión de viga simplemente apoyada	64
Figura 19. Viga simplemente apoyada.	80

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Diagrama Momento-Curvatura de la viga reforzada con acero en tensión y compresión.....	70
Gráfico 2. Diagrama Momento-Curvatura de la viga reforzada con GFRP en tensión y compresión.....	72
Gráfico 3. Diagrama Momento-Curvatura de la viga reforzada con GFRP en compresión y acero en tensión.	74
Gráfico 4. Diagrama Comparativo de Momento-Curvatura.....	75
Gráfico 5. Diagrama esfuerzo-deformación en tensión del concreto en vigas reforzadas con acero, GFRP y GFRP-acero.....	77
Gráfico 6. Diagrama esfuerzo-deformación a compresión del concreto en vigas reforzadas con acero, GFRP y GFRP-acero.....	78
Gráfico 7. Fuerza-Deflexión de viga doblemente reforzado con acero.....	83
Gráfico 8. Fuerza-Deflexión de viga doblemente reforzado con GFRP.	86
Gráfico 9. Fuerza-Deflexión de viga doblemente reforzado con GFRP y acero.....	89
Gráfico 10. Fuerza-Deflexión de viga doblemente reforzado.	91

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un análisis comparativo del comportamiento estructural en flexión, entre vigas reforzadas con varillas de vidrio frente a las reforzadas con acero. Es pertinente mencionar que el enfoque del estudio es cuantitativo, el diseño es no experimental, basado en una revisión bibliográfica sistemática, en páginas como Dialnet, Google académico, biblioteca Miguel Cervantes, Renati, etc. Dentro de las investigaciones más relevantes se tiene a Almada, Bárcena y Enciso (2015), para el cálculo de momento de curvatura y Almerich (2010). el análisis de deflexión instantánea de la viga, de acuerdo a las ecuaciones de Branson. Esta ecuación brinda una deflexión muy cercana a la deflexión experimental, por lo cual ha sido incorporado en las normas de ACI. Dentro de las conclusiones más relevantes se tiene en relación a la ductilidad. Se puede mencionar que al observar y analizar el grafico se puede concluir que, en las dos vigas reforzadas con GFRP en tensión, el elemento falla por rotura del concreto más no por ruptura de las barras de GFRP. Entonces se cumple la relación cuantía / cuantía balanceada > 1 , la falla se da por rotura del concreto. En relación al esfuerzo deformación, la viga reforzada con GFRP (tensión y compresión) es quien soporta menor carga hasta llegar al punto de falla de rotura del concreto ($\epsilon_c=0.003$). Por lo que se puede concluir que las varillas GFRP en compresión no es buen elemento para reforzar una viga. La deflexión calculada por la ecuación de Branson y lo experimental realizado por Almerich (2010), en una viga doblemente reforzado con GFRP, son muy próximos entre sí, por lo tanto, se da como valido el diseño y el análisis de deflexión realizados en la presente tesis.

Palabras claves: comportamiento estructural, vigas reforzadas con varillas de vidrio y vigas reforzadas con acero convencional.

ABSTRACT

The main objective of this work is to develop a comparative analysis of the structural behavior between beams reinforced with glass rods against those reinforced with conventional steel, taking as reference the point of flexion. It is pertinent to mention that the focus of the study is quantitative, the design is non-experimental, based on a systematic bibliographical review, on pages such as Dialnet, Google academic, Miguel Cervantes, Renati, etc. Among the most relevant research is Almada, Bárcena and Enciso (2015), for the calculation of curvature moment and Almerich (2010). the analysis of instantaneous deflection of the beam, according to Branson's equations. This equation provides a deflection very close to the experimental deflection, which is why it has been incorporated into the ACI norms. Among the most relevant conclusions is In relation to ductility. It can be mentioned that when observing and analyzing the graph it can be concluded that, in the two beams reinforced with GFRP in tension, the element fails due to breakage of the concrete, but not due to breakage of the GFRP bars. Then the ratio quantum / amount balanced > 1 is fulfilled, the failure is given by breakage of the concrete. In relation to the deformation stress, the beam reinforced with GFRP (tension and compression) is the one that bears the lowest load until reaching the breaking point of the concrete ($\epsilon_c = 0.003$). So it can be concluded that GFRP rods in compression is not a good element to reinforce a beam. The deflection calculated by the Branson equation and the experimental made by Almerich (2010), in a beam double reinforced with GFRP, they are very close to each other, therefore, the deflection design and analysis carried out in this thesis is valid.

Keywords: structural behavior, beams reinforced with glass rods and beams reinforced with conventional steel

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Desde el pasado, el tema de la construcción de obras ha estado en constante observación y cuestionamiento, teniendo presente la resistencia y durabilidad de las estructuras. De allí pues, que los materiales sean centro de atención y evolución a través del tiempo. En un principio se trabajaba con materiales rudimentarios, a los cuales se tenía acceso en el momento. En la medida que el tiempo avanza se incorporan nuevos materiales, como ladrillos, maderas, piedras calizas y mármol, los cuales se encuentran en las grandes estructuras como: coliseos, ciudades y estructuras emblemáticas de esas épocas.

En las últimas décadas, esta realidad evoluciona a pasos agigantados, las edificaciones responden a las exigencias y demandas actuales; en efecto, la ingeniería civil forma parte de esta evolución, debe entonces estar en una busca constante de nuevas tecnologías y materiales para garantizar, no solo obras modernas, también se busca la resistencia y durabilidad en el tiempo. Dentro de estos avances, se puede mencionar la incorporación de nuevos materiales al área de la construcción, por ejemplo, como refuerzo para el concreto surgió el acero. De acuerdo con Almerich (2010):

Los rápidos avances en la tecnología de los materiales de construcción han permitido a los ingenieros civiles obtener impresionantes ventajas en la seguridad, la economía y la funcionalidad de las estructuras construidas para servir a las necesidades de la sociedad, mejorando el nivel de vida de las personas (p. 3).

Ante esta visión de la realidad, que combina seguridad, economía y funcionalidad de las estructuras, el acero a ser cuestionado. Evidentemente, se plantea la utilización de nuevos materiales, que por su composición den respuesta a las necesidades existentes; además de ser más rentable y eficaz. Dentro de las desventajas de la utilización del acero, está la corrosión la cual ha sido considerada una reacción química desfavorable en los materiales.

Otro aspecto a considerar al utilizar el acero es el costo que se genera por corrosión del mismo a corto y largo plazo, lo que se traduce en pérdidas, en inversión para mitigar el daño.

De acuerdo con Escamilla y Loza (2004):

Con el afán por mejorar la durabilidad del concreto, se ha investigado el empleo de otros tipos de materiales para el refuerzo del concreto, entre ellos se encuentran las varillas de materiales compuestos, comúnmente conocidos como FRP (fiber reinforced polymers) en donde una matriz polimérica envuelve a las fibras, que pueden ser de diferentes materiales, formando así el compuesto (p. 1).

En este sentido, para aumentar la durabilidad del concreto se incorporan nuevos materiales como la fibra de vidrio, se empiezan a utilizar varillas reforzadas con fibra de vidrio. De acuerdo con Almerich (2010), la incorporación de los materiales compuesto en el área de las obras civiles, permiten obtener muchas ventajas y beneficios, estableciendo una relación coste y durabilidad. También, su capacidad de resistir la corrosión y su poca vulnerabilidad ante los efectos químicos “Estas características pueden aportar una mayor seguridad y ciclo de vida, así como proporcionar un ahorro en los costes de fabricación y mantenimiento de las mismas” (p.3).

Esta investigación se centra, en la necesidad de profundizar para conocer las características que pueden presentar las varillas de fibra de vidrio, en relación a las varillas de acero y su efecto, tomando como referencia el punto de flexión. Partiendo de las diferentes pruebas que se han realizado para determinar las reacciones físicas, químicas y mecánicas, que pueden presentarse. Estableciendo una idea del nivel de durabilidad y resistencia que pueden ofrecerle al concreto, al ser utilizado como refuerzo del concreto.

1.1 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La formulación del problema, permite al investigador centrarse en el tema a investigar, en este caso en particular, se enfatiza los problemas que, a través del tiempo de utilización en la construcción ha presentado el acero convencional. Resaltando que, en vigas de concreto, presenta altos niveles de corrosión, las cuales aumentan en ambientes agresivos.

Partiendo de las consideraciones anteriores, se plantea incluir otros materiales alternativos, que puedan sustituir al acero convencional, pero que, además, presenten mejores características físicas, mecánicas y químicas. Dentro de los nuevos materiales, emergen las varillas de plástico reforzada con fibra de vidrio, asumiéndolas como una alternativa viable, que posee también, muchas ventajas debido a su bajo costo, alta resistencia en trabajos que requieran flexión e inmune a la corrosión.

Finalmente, se puede mencionar que la investigación se enfoca en el estudio no experimental comparativo del comportamiento estructural en flexión, entre vigas reforzadas con varillas de vidrio frente a las reforzadas con acero.

1.1.1 Realidad problemática

Al hablar del concreto armado, es indispensable mencionar las vigas, las cuales contribuyen a soportar las cargas en flexión. Es necesario mencionar que el acero, se viene utilizando en las obras, debido a su alta resistencia a tensión. Sin embargo, este material presenta ciertas propiedades que afectan directamente su adherencia con el concreto, al momento de corroerse. El efecto de la corrosión también se le denomina exfoliación, está relacionada con la pérdida de capas o laminas; además, se presenta la reducción de área transversal del acero, también conocido como delaminación, ambos efectos afectan la capacidad de soporte de la estructura.

Esta realidad se presenta desde hace muchos años, lo que ha permitido realizar

investigaciones para encontrar otras alternativas que ofrezcan mejores características físicas, químicas y mecánicas. Siendo, más económicas y sustentables, es así como surge la fibra de vidrio, resaltando su peso, alta resistencia física, además de ser inmune a la corrosión. Teniendo como referencia lo antes mencionado, se puede afirmar que las características mecánicas de las vigas reforzadas con fibras de vidrio requieren ser observadas y evaluadas; además, de comparadas con las de acero. Para aportar resultados que permitan comprender el comportamiento del esfuerzo de compresión y tensión del concreto, la flexión, entre otros.

1.1.2 Problema general y específico

Problema general.

- ¿Cuál será el análisis comparativo del comportamiento estructural en flexión, entre vigas reforzadas con varillas de vidrio frente a las reforzadas con acero?

Problemas específicos.

- ¿De qué manera las vigas reforzadas con varillas de vidrio en relación a la ductilidad, tendrán mejor comportamiento estructural en flexión frente a las vigas reforzadas con acero convencional?
- ¿Cuál será el esfuerzo de compresión y tensión del concreto en vigas reforzadas con varillas de vidrio y las reforzadas con acero convencional, frente la viga reforzado con acero y GFRP?
- ¿Cuál será la deflexión de vigas reforzadas con varillas de vidrio y las reforzadas con acero convencional, frente la viga reforzado con acero y GFRP?
- ¿Cuáles serán los costos estimados de cotización y traslado de varillas GFRP, para su incorporación en las obras de construcción?

1.2 ANTECEDENTES

Lalvay (2017), en su tesis titulada: *Análisis, Comportamiento y Comparación de Varillas Corrugadas en Fibra de Vidrio, con Relación a las Varillas convencionales; Conjuntamente en Elementos Estructurales de Hormigón*, presentado en la Universidad de Azuay, como requisito para optar al grado de ingeniero civil con énfasis en gerencia de la construcción. El objetivo de la investigación está referido a evaluar las propiedades físicas y mecánicas de la varilla de fibra de vidrio, para obtener información sobre sus características y así tener un amplio conocimiento sobre este nuevo material de la construcción.

Este estudio se centra en comparar dos tipos de varillas corrugadas; la primera de acero y la segunda de fibra de vidrio. De esta forma se realizó los ensayos de tensión y compresión de cada varilla; luego se analizó y dimensionó con las normas del ACI 318S-08 y de la NEC 15 Tanto vigas y columnas de hormigos usando ambos materiales como refuerzo, para así poder realizar los respectivos ensayos; todo esto con el fin de obtener las características físicas y mecánicas de las varillas de fibra de vidrio y acero, como también el comportamiento de cada una de ellas. Dentro de las conclusiones señala:

- En el ensayo a tensión se pudo determinar características como el módulo de elasticidad y el punto de ruptura de cada una de las varillas, dando como resultado en el acero el mismo módulo de elasticidad y curva de esfuerzo deformación que se ha venido trabajando en estos tiempos; mientras que la varilla de fibra de vidrio presento un módulo de elasticidad y una curva esfuerzo deformación distinta para cada diámetro de varilla. Así mismo, en este ensayo la varilla de fibra de vidrio falló por aplastamiento en las mordazas debido a que sus corrugas se desprendieron; además, se comprobó que en la fibra a menor diámetro mayor esfuerzo.
- En el ensayo a compresión se estableció el esfuerzo a la compresión con la respectiva

deformación; dando como resultado que la varilla de fibra de vidrio presenta una curva esfuerzo deformación distinta a la del acero.

- En los ensayos mencionados anteriormente la varilla de vidrio de 12mm de diámetro presento características muy inferiores a la del acero; las únicas que lograron tener un comportamiento superior a la del acero fueron las de 6 y 8mm de diámetro.
- En las varillas de fibras de vidrio se apreció un comportamiento sumamente interesante, y es que al momento de quitar la carga de compresión la varilla retomo su forma original, pero presentando pequeñas fisuras; todo lo contrario, al acero.
- La varilla de fibra de vidrio tiene un cierto ángulo de restricción de más o menos 60 grados, el cual cuando es superado ésta se rompe y es que por ser un material muy rígido que no permite dobleces muy altas.
- Ante el análisis a flexión las vigas presentaron una flecha mayor a la calculada; en la del acero la deformación de la viga sobrepaso con unos 3mm, y en las vigas de fibra de vidrio la deformación sobrepaso con unos 10mm aproximadamente, esto se debe a que el módulo de elasticidad de la varilla de fibra de vidrio es muy bajo.
- El análisis respectivo de las columnas como de las vigas se realizó con las fórmulas del acero; sin embargo, estas no se acoplaron a la varilla de fibra de vidrio debido a que en los ensayos presentaron diferencias en carga y deformación; en la carga soportó entre el 10-15% más que la calculada y en deformaciones un 8% más.
- La adherencia de la varilla de fibra de vidrios resulto ser baja, por lo que en el análisis a flexión ésta presento desplazamiento en la viga; además, sus corrugas se desprendieron cuando la carga estaba cerca del 90% generando una adherencia baja entre la varilla y el concreto.
- La varilla de fibra de vidrio con la que se trabajó es de origen ruso, la cual sostiene el mismo comportamiento que la española analizada en la bibliografía leída para el presente

trabajo; pero esta varilla española se diferencia ya que si permite su doblez.

De esta investigación, se puede extraer datos muy importantes como las características físicas y mecánicas de las varillas GFRP (6mm, 8mm y 12mm), así tener amplio conocimiento del material próximo a estudiar como refuerzo de las vigas armadas.

El resumen de los ensayos realizados es:

Tabla 1. Datos de Ensayo a tensión de GFRP de 6,8 y 12mm

Varilla GFRP	Carga de Rotura (KN)	Módulo de Elasticidad (Kg/cm²)	Límite de fluencia (kg/cm²)
6	26.46	1251670.00	9875.00
8	41.22	943550.00	8675.00
12	46.99	494209.00	4250.00

Fuente: Rivadeneira (2017).

Tabla 2. Datos de Ensayo a compresión de GFRP de 6,8 y 12mm

Varilla GFRP	Carga de Rotura (KN)	Esfuerzo a compresión (Kg/cm²)
6	10.75	37.00
8	17.32	33.00
12	19.54	16.00

Fuente: Rivadeneira (2017).

Núñez (2017), en su trabajo de investigación titulado: Diseño a flexión de vigas de concreto armadas con refuerzo combinado de acero y PRFV (refuerzo híbrido). El concreto armado es uno de los materiales más empleados en la construcción, las barras de polímeros reforzados con fibras (PRF) como refuerzo del mismo se han convertido en una alternativa viable para garantizar una mayor resistencia y durabilidad en las estructuras debido a su bajo peso y a su alta resistencia a la corrosión. Sin embargo, estas presentan una significativa fragilidad, por lo que se han tomado alternativas como incluir barras de acero a la armadura bajo el concepto de un refuerzo híbrido capaz de aprovechar las ventajas que brindan cada uno de estos materiales y aumentar la ductilidad de los elementos.

Actualmente no existe una metodología que permita el cálculo de este tipo de refuerzo, por lo que en el presente trabajo se propone una, que prueba la efectividad en el diseño de vigas de concreto sometidas a flexión simple. Se analizan los diagramas de deformaciones y la caracterización de las fallas balanceadas para cada uno de los materiales, y de esta manera se identifica una región común al diseño que facilita el cálculo de las áreas de refuerzo, apoyándose en un programa de cálculo creado específicamente para esta metodología. De acuerdo a las conclusiones:

La revisión bibliográfica sobre los polímeros reforzados con fibras de vidrio (PRFV) y su empleo en la construcción como refuerzo de elementos de concreto armado, a partir del estudio de los principales reglamentos y autores que abordan el tema, permitió identificar que el empleo de los mismos resulta una solución favorable por las ventajas probadas de este material: elevada resistencia a la tensión, no corrosión y bajo peso, entre otras; pero la fragilidad que exhibe en su comportamiento así como su baja resistencia al fuego, ha llevado a los investigadores a buscar soluciones como el refuerzo combinado con acero, que permitan aprovechar las ventajas de ambos materiales.

A partir del estudio de los modelos analíticos y bases para el diseño establecidos en las normativas ACI 318-11 y ACI 440 2R-06 para el diseño de elementos de concreto armado con acero y PRF respectivamente, se logra identificar dentro del diagrama de dominios una región común que satisface los requisitos de diseño dispuestos para cada material, con lo cual se valida la hipótesis propuesta.

Se brinda una propuesta de metodología para el diseño y revisión de la armadura híbrida (acero-PRFV) en vigas de concreto armado. Tomando como base esta metodología y teniendo como premisa que la profundidad de la línea neutra para el diseño debe permanecer entre $0.231d$ y $0.375d$, se crea un programa matemático que permite el cálculo

de las áreas de refuerzo (acero y PRFV) en vigas de concreto armado.

Los estudios realizados por el autor, nos ayuda a comprender el comportamiento del acero y del PRFV como refuerzos en el concreto armado. Resaltando entre sus conclusiones, para el diseño mixto de concreto armado lo siguiente:

- Considerar el acero cuantías menores que la balanceada, así garantizar que las barras de acero entren en fluencia antes del fallo del elemento, así mismo para el PRFV asignar cuantías mayores que la balanceada, para que las barras de vidrio no alcancen su máxima deformación.

Rivadeneira (2016), en su tesis titulada: Correlación entre vigas de concreto armadas con varillas de acero y con varillas de fibra reforzada con polímero FRP sometidas a esfuerzos de flexión en los tercios del claro. Hasta la fecha se conoce al acero como único material de refuerzo del concreto armado, a pesar de su vulnerabilidad a la corrosión. Esta investigación tiene como objetivo analizar el uso de la Fibra Reforzada con Polímero (FRP) como una alternativa al acero en el concreto armado sometido a esfuerzos de flexión, por tal razón, el desarrollo de la investigación se la hizo mediante la construcción tres tipos de especímenes, los cuales son de concreto simple y de concreto armado con varillas de acero y con varillas de fibra de vidrio reforzada con polímero de igual diámetro.

La investigación pretende analizar las características que brinden los dos materiales como refuerzo del concreto armado, para lo cual, al ser ensayados los especímenes, se obtuvo la carga máxima para el cálculo del Módulo de Rotura correspondiente. Mientras se desarrollaba el ensayo de las vigas, se llevó un control de la carga en la cual apareció la primera fisura en la superficie traccionada de las vigas. Mediante el Módulo de Rotura, se realizó una comparación, obteniéndose un índice de aporte a la resistencia del concreto armado sometido a dicha sollicitación, el resultado refleja que, gracias a la alta resistencia a

la tensión del GFRP, este aporta con una resistencia mayor que el acero, marcando una diferencia significativa y gracias al control llevado de las cargas se verificó el aporte adherente entre el concreto y el refuerzo, resultado que reflejó que el GFRP trabajó con una adherencia Concreto-Refuerzo menor que el acero. Dentro de las conclusiones destaca:

- El uso de las varillas de GFRP como refuerzo del concreto armado mejora las condiciones de este sometido a esfuerzos de flexión, obteniéndose un Módulo de Rotura de 14,43 MPa, mientras que, el Módulo de Rotura del concreto armado con varillas de acero es de 12,81 MPa.
- Mediante los ensayos realizados, se demuestra que los dos materiales de refuerzo aportaron resistencia al concreto sometido a esfuerzos de flexión, siendo el acero quien aporta con una mayor resistencia al concreto en edades iniciales y a partir de que el concreto se acerca a la edad en la cual alcanza la resistencia a la compresión de diseño, el GFRP es quien brinda un mayor aporte ante los esfuerzos de flexión.
- Se realizó el análisis económico utilizando los dos materiales como refuerzo del concreto armado, en el cual, se demuestra mediante la Tabla 12, que el acero sigue siendo el material idóneo para su uso, debido a que, tiene un mejor costo por MPa alcanzado.
- Por la resolución de la investigación, se demuestra que, el aporte GFRP como material de refuerzo al concreto armado sometido a esfuerzos de flexión, favorece al desarrollo de la ingeniería civil gracias a su aporte a dichas solicitaciones, debido a su rigidez y alta resistencia a la tensión, demostrado tras la realización de los ensayos de rotura de vigas.

Esta investigación aporta datos importantes, en la elaboración de mi investigación, como en la Tabla 3:

Tabla 3. Datos referentes a la adherencia entre el armado y el hormigón.

Vigas Armadas						
Edad [días]	Módulo de Rotura R con GFRP			Módulo de Rotura R con Acero		
	Carga total [KN]	Carga en la cual aparece la primera fisura en el espécimen [KN]	Relación entre la carga en la cual aparece la primera fisura y la carga total [%]	Carga total [KN]	Carga en la cual aparece la primera fisura en el espécimen [KN]	Relación entre la carga en la cual aparece la primera fisura y la carga total [%]
28	76.53	40.01	52%	68.04	64.45	95%
21	83.14	51.29	62%	72.16	63.21	88%
14	81.90	60.83	74%	66.25	38.06	57%
7	64.25	50.78	79%	77.19	40.69	53%

Fuente: Rivadeneira (2016).

En esta tabla se relaciona la edad, con diversas variaciones de la carga, definiendo el módulo de ruptura. Además, el estudio aporta importantes conclusiones relacionadas con el costo económico del acero.

Díaz y Wainshtok (2016), en su investigación titulada: diseño de viga continua de concreto armada con barras de polímeros reforzados con fibras de vidrio (PRFV). La corrosión de las barras de acero de refuerzo constituye una de las principales causas del deterioro de las estructuras de concreto armado, la cual cobra particular importancia en países como Cuba, de humedad relativa alta y marcada influencia del intemperismo sobre la mayoría de las edificaciones. Procurando eliminar el problema de la corrosión y con ello incrementar la vida útil de las construcciones, a finales del pasado siglo comienza a utilizarse en países como Japón, Canadá y USA, barras compuestas de polímeros reforzadas con fibras no metálicas (PRF) en sustitución de las barras de acero.

Sin embargo, el dominio de los modelos analíticos para diseñar y proyectar con esta tipología de refuerzo, es realmente limitado en la mayoría del mundo, debido principalmente a la insuficiencia de especificaciones, normas y códigos para el diseño de elementos de concreto reforzados con este material. Existen numerosas analogías en los modelos

analíticos que se utilizan para definir las cuantías de refuerzo, ya sea recurriendo al acero o a los PRF, aunque existen también singularidades para este último caso que no deben obviarse. En el presente trabajo se presenta el diseño de una viga continua de concreto reforzada con barras de PRFV, procurando una metodología que sirva de guía para el diseño de elementos a flexión y se establece una comparación con los resultados que arroja el diseño de esta misma viga reforzada con armadura pasiva. Dentro de las conclusiones menciona:

- Es posible concebir un diseño hiper-reforzado, para el caso de una viga continúa reforzada con PRFV con un incremento de la cuantía de diseño para la sección de momento negativo (momento máximo) con respecto a la considerada para aquella de momento positivo ($\rho f(inic) = 1.1\rho fb$).
- La selección del peralte por un criterio de deformación conlleva a diseños holgados en el cumplimiento de los estados límites últimos de flexión ($d_{real} > d_{min}$ y $Mu \ll \emptyset Mn$) y cortante ($S_{máx} \ll S_{req}$), en particular en el diseño de la sección para momento positivo, lo cual confirma que los estados límites de servicio vienen a gobernar los diseños para este tipo de refuerzo.
- Aun cuando el diseño de la viga continúa reforzado con barras de PFV requiera de un mayor peralte, el diseño conduce al empleo de un menor número de barras de refuerzo y consecuentemente puede conducir a menores costos totales, añadiéndole una ventaja más a las ya conocidas, como su elevada resistencia a la corrosión, bajo peso, etc.

Esta investigación contribuye con información importante referida a la comparación de datos técnicos y económicos, dentro de los aspectos técnicos se tiene que:

HORMIGÓN $f'_c = 25MPa$	ACERO		
	$f_y = 300MPa$ ARMADURA LONGITUDINAL		
$b \times h$ (CM)	REFUERZO		
	FLEXION		CORTANTE
30 x 30	M^+	M^-	$\emptyset 10 @ 120mm$
	$A'_s \rightarrow 2\emptyset 22$ $A_s \rightarrow 3\emptyset 22$	$A'_s \rightarrow 2\emptyset 22$ $A_s \rightarrow 5\emptyset 22$	

Figura 1. Resultados del diseño de viga continua de hormigón armada con acero.

Fuente: Diaz y Wainshtok (2016).

Material	Calidad	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo inicial(\$)	Costo Total (\$)
Hormigón reforzado con acero					
Hormigón	25 MPa	0,81 m ³	72,62	58,82	232,72
Acero	300 MPa	$\emptyset 10$	62,7 m	0,482	
		$\emptyset 22$	54,84 m	2,62	
Hormigón reforzado con PRFV					
Hormigón	25 MPa	1,22 m ³	72,62	88,60	185,37
PRFV	800 MPa	$\emptyset 10$	46,2 m	0,65	
		$\emptyset 22$	51,34 m	1,30	

Figura 2. Costos totales de viga 30x30 reforzados con acero y PRFV en Cuba.

Fuente: Diaz y Wainshtok (2016).

En efecto se evidencian los límites de flexión del acero en mayor o menor esfuerzo. Se resalta la factibilidad del empleo de PRF como refuerzo del hormigón, como alternativa a la utilización de las vigas de acero continuas.

Almada, Bárcena y Enciso (2015), en su artículo titulado: Determinación y análisis de la gráfica Momento - Curvatura de diferentes secciones de vigas de concreto reforzado. El comportamiento de vigas de concreto reforzado puede ser analizado a través de generar la gráfica Momento – Curvatura ($M-\phi$) de una sección. El artículo presenta el desarrollo de las ecuaciones para generar las gráficas $M-\phi$ de secciones rectangulares, triangulares y trapecoidales con acero en tensión y en compresión.

Los puntos de la gráfica, incluyendo los principales: Momento de agrietamiento, Momento de fluencia del acero, así como el Momento de falla con sus respectivas

curvaturas, son determinados considerando una distribución parabólica para los esfuerzos de compresión y lineal para los esfuerzos de tensión en el concreto, mientras que los esfuerzos de tensión y compresión del acero se consideran bilineales.

Se analiza la ductilidad de un elemento en flexión de acuerdo al Reglamento del ACI comparando la máxima y mínima curvatura correspondiendo al área de acero mínima y a máxima respectivamente, así como el efecto de proporcionar acero a compresión a un elemento. Por otro lado, se determina la rigidez del elemento antes de la primera grieta, y se analiza la pérdida de rigidez a medida que el elemento aumenta su curvatura hasta llegar a la fluencia del acero y a la falla.

Dentro de los aportes más significativos se tiene que, explica la contribución de la fuerza a tensión del concreto para el cálculo del momento a falla para el caso estudiado es del orden de 0.0164 %, por lo que se explica lo establecido por el reglamento ACI 318S-2011, añade también que “La resistencia a tensión del concreto no debe considerarse en los cálculos de elementos de concreto reforzado sometidos a flexión y a carga axial, excepto cuando se cumplan los requisitos de 18.4 referente a concreto presforzado”.

Maher A; Mohamed S, Mahmoud, A y Shanour, A. (2014): Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Benha University, 108 Shoubra St., Shoubra, Cairo, Egypt.

Este artículo presenta un estudio experimental, numérico y analítico del comportamiento de flexión del concreto en vigas reforzadas con barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP) producidas localmente. Reforzado con fibra de vidrio barras de refuerzo de polímeros (GFRP) tiene una rigidez menor que el refuerzo de acero, que debería tener en cuenta las condiciones finales y de servicio, incluido el impacto en la

deflexión del miembro y anchos de grietas. Las barras son producidas localmente por piezas dobles mueren molde utilizando materias primas de recursos locales. Se proyectó un total de diez vigas, que medían 120 mm de ancho x 300 mm de profundidad x 2800 mm de largo. probado hasta la falla bajo flexión de cuatro puntos.

Los principales parámetros fueron tipo de material de refuerzo (GFRP y acero), resistencia a la compresión del concreto y relación de refuerzo (μ_b , $1.7\mu_b$ y $2.7\mu_b$; donde μ_b es la relación de refuerzo en condiciones equilibradas). La deflexión del tramo medio, el ancho de fisura y el GFRP cepas de refuerzo de las vigas probados se registraron y se compararon.

Los resultados de la prueba revelaron que el ancho de fisura y la deflexión del tramo medio se redujeron significativamente al aumentar el refuerzo proporción. La carga final aumentó en un 47% y 97% a medida que la relación de refuerzo aumentó de μ_b a $2.7 \mu_b$. Las muestras reforzadas con $2.7 \mu_b$ pueden producir cierta cantidad de ductilidad proporcionada por el concreto. La tensión registrada de refuerzo GFRP alcanzó el 90% de las cepas definitivas. Un elemento finito no lineal el análisis (NLFEA) se construyó para simular el comportamiento de flexión de las vigas probados, en términos de patrón de grietas y comportamiento de deflexión de carga. Se puede considerar un buen acuerdo entre los y se lograron resultados numéricos.

Modificaciones a la ecuación ACI 440.1R-06 para estimar el momento efectivo de inercia (I_e) de las vigas de concreto reforzado con FRP, utilizando el análisis de regresión de resultados, se propone al introducir factores empíricos que efectivamente disminuyen el I_e a alta carga nivel. La ecuación propuesta se compara con diferentes disposiciones del código y modelos previos para predecir la desviación. Se puede probar que los factores propuestos dan una buena estimación para el momento efectivo de inercia (I_e) funciona bien para vigas de concreto reforzado con FRP a alto nivel de carga.

Dentro de las conclusiones señala:

- Las barras de GFRP producidas localmente exhiben propiedades mecánicas razonables en comparación con los productos comerciales en términos de fracción de volumen de fibra (70%), resistencia a la tensión (640 MPa) y módulo elástico (30.000 MPa).
- La falla en las vigas de GFRP RC reforzada con más que el refuerzo equilibrado μ_b tiende a ser falla de compresión debido a la trituración de concreto. Mientras, Vigas reforzadas con GFRP relación en orden de menor o casi igual a la equilibrada relación de refuerzo μ_b muestra signos de ruptura de GFRP reforzamiento.
- Aumentando la resistencia a la compresión del concreto en el orden de 25 MPa a 45 MPa tiende a reducir el ancho de fisura en un 52%, mientras que el ancho de la grieta tiende a disminuir en un 80% cuando el concreto la resistencia a la compresión aumentó de 25 MPa a 70 MPa.
- Las curvas de deflexión de las cargas fueron bilineales para todas las vigas reforzados GFRP. La primera parte de la curva hasta la fisuración representa el comportamiento de las vigas no fisurados. La segunda parte representa el comportamiento de los rayos agrietados con rigidez reducida. Sin embargo, las muestras de GFRP con relación de refuerzo, 2.7 μ_b , tienden a tener cierta cantidad de ductilidad.
- El aumento de la relación de refuerzo de μ_b a 1.7 μ_b , para la serie A70, tiende a aumentar la capacidad final de 84.6 kN a 132.7 kN, respectivamente. Si bien el aumento de la relación de refuerzo de 1,7 μ_b a 2,7 μ_b , sin embargo, tiende a aumentar la capacidad final de 132,7 kN a 145,1 kN, respectivamente.
- La cepa de compresión máxima de concreto ϵ_{cu} se registró entre 0.29% y 0.66%.
- La tensión de refuerzo de tensión registrada para barras GFRP alcanzó el rango de 0.012-0.0177, estas cepas corresponden a aproximadamente 60-90% de las cepas finales

estimadas de las barras de GFRP obtenido de la prueba de tensión.

- Se puede considerar un buen acuerdo entre los resultados experimentales y el análisis numérico se logró en términos de las cargas finales previstas de las muestras de prueba en comparación con los resultados experimentales. Además, el análisis numérico reflejó la importancia de los parámetros de prueba investigados en la capacidad de carga.
- De acuerdo con los resultados experimentales, la relación de refuerzo y el módulo elástico de las barras de GFRP pueden ser las variables más significativas para calcular la deflexión. Los efectos de las dos variables mencionadas anteriormente se consideran en la ecuación propuesta por Mousavi y Esfahani [22]. La desviación estimada mediante este modelo tiende a ser más precisa que las predichas utilizando muchas disposiciones de normas y reglamentos.

Esta investigación permite evidenciar, la falla de la viga GFRP RC reforzada, resaltando que esta falla se centra en la trituración del concreto, mientras, la viga reforzadas con GFRP relación en orden de menor o casi igual a la equilibrada relación de refuerzo μ_b muestra signos de ruptura de GFRP reforzamiento, esta información es importante al momento de seleccionar el tipo de material a utilizar.

Almerich (2010), en su tesis titulada: Diseño, según estados límites, de Estructuras de concreto armado con Redondos de fibra de vidrio GFRP. Desde la aparición de los redondos de fibra de vidrio como armado del concreto, las recomendaciones existentes sobre su uso, están en continua revisión al tratarse de un material innovador en el mundo de la ingeniería. Sin embargo, todos los códigos y guías de diseño existentes de elementos de concreto armado con redondos de GFRP, no consideran en el diseño la resistencia a compresión de los redondos, al no existir métodos de ensayos contrastados, ni resultados homogéneos en los mismos, despreciándose su contribución debido a su bajo módulo de

elasticidad, y a consideraciones económicas injustificables.

Esta tesis se centra en definir un método de diseño y cálculo de elementos de concreto armado con redondos de fibra de vidrio, incluyendo su uso como armadura a compresión, así como su posible resistencia frente al fuego. La tesis presenta una metodología adecuada a una investigación de los elementos de concreto armado con este tipo de redondos, basándose principalmente en una amplia base experimental. Se realiza una recopilación bibliográfica y una elaboración de un estado del arte de las aplicaciones de los redondos de FRP como armado del concreto, y de las directrices existentes en cada uno de los códigos o guías vigentes. Tras ello, se recoge el proceso y los resultados de los trabajos experimentales de los ensayos de tensión, compresión, cortante y adherencia ejecutados a las probetas de fibra de vidrio RTHp, con el fin de obtener de sus características mecánicas, para posteriormente lograr su ratificación por el CSIC, a través del Instituto “Eduardo Torroja”, dando pie a la comprobación de su uso como armadura a compresión en elementos de concreto armado.

Conocido el comportamiento de los redondos, se elabora unas directrices de diseño para elementos de concreto armado bajo estados límites, cumpliendo con los preceptos marcados por la EHE-08 con respecto a la compatibilidad de tensiones y deformaciones, modificándolos en función de las características intrínsecas de los redondos armados con fibra, desarrollando especialmente las correspondientes al comportamiento a flexión, cortante y compresión, en cuanto a Estados Límites Últimos, y las de fisuración y deformaciones, en los Estados Límites de Servicio.

Para la comprobación de dichas directrices de diseño, se ensayan elementos de concreto armado con redondos RTHp a flexión y a compresión, donde se caracteriza su comportamiento, comparando los resultados experimentales con los obtenidos analíticamente, modificando las directrices de diseño con factores de corrección que

compatibilizan dichos resultados.

Con todo ello, se implementa una aplicación informática, con una introducción sencilla y lógica de los distintos parámetros necesarios para el diseño y comprobación de elementos de concreto armado con redondos de fibra de vidrio RTHp.

Por último, se lleva a cabo un estudio, tanto analítico como experimental, realizando los ensayos bajo cargas de fuego en los laboratorios de AIDICO, obteniendo resultados experimentales que han permitido verificar el planteamiento analítico inicial, el cual ya suponía su buen comportamiento frente al fuego.

Dentro de los aportes de esta tesis, se puede mencionar que, la teoría de los Estados Límites es esencial para determinar la capacidad de los elementos de hormigón armado con redondos de GFRP. Evidencia también la necesidad de utilizar métodos alternativos en los modelos experimentales, los cuales puede ser entendidos como aportes que generan ciertas ventajas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General.

- Desarrollar un análisis comparativo del comportamiento estructural en flexión, entre vigas reforzadas con varillas de vidrio frente a las reforzadas con acero.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Determinar de qué manera las vigas reforzadas con varillas de vidrio en relación a la ductilidad, tendrán mejor comportamiento estructural en flexión frente a las vigas reforzadas con acero convencional.

- Determinar el esfuerzo de compresión y tensión del concreto en vigas reforzadas con varillas de vidrio y las reforzadas con acero convencional, frente la viga reforzado con acero y GFRP.
- Determinar la deflexión de vigas reforzadas con varillas de vidrio y las reforzadas con acero convencional, frente la viga reforzado con acero y GFRP.
- Estimar los costos estimados de cotización y traslado de varillas GFRP, para su incorporación en la construcción de obras en Perú.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Desde el punto de vista práctico, la investigación permite abordar el acero convencional, siendo este uno de los materiales más empleado a nivel mundial. Es importante señalar que existen muchos estudios, dirigidos a medir el impacto ambiental y el agotamiento de los recursos no renovables. Esta realidad ambiental permite comprender la importancia de disminuir el consumo masivo de acero, colaborando así con el nivel de impacto ambiental.

Entonces, el estudio ofrece alternativas de solución más amigables con el medio ambiente, que puedan en gran medida sustituir al acero convencional, pero con características similares, que no sean vulnerables a la corrosión. Dentro de los materiales que en un principio fueron considerados se encuentran: el basalto, los piloneros, fibras de carbono y fibras de vidrio.

Ante esta nueva visión, países en desarrollo comienza a utilizar en el ámbito de la construcción la fibra de vidrio, los resultados fueron tan beneficiosos que hoy día, cuentan con normas que reglamentan este tipo de construcción, es válido señalar que el Perú, aún no cuenta con una reglamentación para el uso de ese tipo de material en obras de construcción.

Asimismo, esta investigación aportara resultados importantes, en relación al establecimiento de la vida útil de estructuras elaboradas con acero y aquellas que tengan

como refuerzo del concreto las varillas corrugadas de fibras de vidrio. Logrando sustituir al acero con fibra de vidrio, incidiendo en los costos de construcción, disminuyendo gastos de manteniendo de estructuras expuestas a ambientes agresivos.

Desde la perspectiva teórica, la investigación servirá de precedente para otros investigadores que decidan continuar con esta línea de investigación, se convierte también en un aporte científico, debido a que sus resultados serán científicamente comprobables, exponiendo una serie de hallazgos investigativos.

1.5 HIPÓTESIS

1.5.1 Hipótesis General.

- Es probable que un análisis comparativo del comportamiento estructural entre vigas reforzadas con varillas de vidrio frente a las reforzadas con acero convencional, permita la demostración ambas vigas.

1.5.2 Hipótesis Específicos.

- Es probable las vigas reforzadas con varillas de vidrio con la ductilidad como indicador tendrán mejor comportamiento estructural en flexión frente a las vigas reforzadas con acero convencional.
- Es probable que el esfuerzo de compresión y tensión del concreto en vigas reforzadas con varillas de vidrio y las reforzadas con acero convencional, muestre mejor comportamiento frente la viga reforzado con acero y GFRP.
- Es probable la deflexión de vigas reforzadas con varillas de vidrio y las reforzadas con acero convencional, muestren mejor comportamiento que la viga reforzado con acero y GFRP.
- Los costos de cotización y traslado de las varillas GFRP, permitirán su incorporación en la construcción de obras en Perú.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 BASES TEÓRICAS

2.1.1 Fibra de vidrio.

En la ingeniería civil se vienen utilizando materiales convencionales, en el área estructural se han incorporado en los últimos años otros, no convencionales como la fibra de vidrio. Se puede decir, que la fibra de vidrio está compuesta de filamentos de vidrio muy finos, que, al entrelazarse, por su condición de aglomerados con resinas, dan origen a una estructura fuerte. De acuerdo con Lalvay (2017), la fibra de vidrio tiene una matriz polimérica: “Esta matriz es la encargada de unir las fibras de vidrio y mantenerlas compactas, también es la encargada de transmitir a las fibras los esfuerzos que se producen alrededor de ella...” (p. 32).

En relación al tema Bravo, (citado por Lalvay, 2017), menciona: “La matriz protege las fibras del deterioro superficial que puede resultar de la abrasión mecánica o de reacciones químicas con el medio ambiente” (p. 32). En efecto, la matriz cumple una función importante en relación a la estructura interna de la fibra.

2.1.1.1 Tipos de fibra de vidrio.

Existen varios tipos de fibra de vidrio, esta varía de acuerdo a su composición química y a la finalidad de su uso. De acuerdo con Escamilla y Loza (2004):

Existen diferentes tipos de fibra de vidrio y se clasifican de acuerdo a su composición química, debido a esto, sus características físicas también son diferentes, algunos tipos comunes que se emplean en la fabricación de las varillas GFRP se mencionan a continuación: tipo E con baja conductividad eléctrica, el tipo AR con alta resistencia a los álcalis, el tipo C con resistencia a la corrosión química, el tipo S con una alta resistencia a la tensión (p. 2).

Es decir, la fibra de vidrio tiene distintos usos en diversos ámbitos de la industria, todo dependerá de la resistencia que se requiera, en concordancia con lo anteriormente señalado Muñoz (Citado por Córdoba y Zapata, 2013), plantean la existencia de por lo menos cinco tipos de fibra:

Vidrio E: Es el más comúnmente usado en la industria textil, como primera evolución industrial en el tema de las fibras. - Vidrio R: De alto desempeño mecánico en relación a fatiga, temperatura y humedad, pedido para sectores como la aviación, espacio y armada. - Vidrio D: De características dieléctricas, usado como material permeable a ondas electromagnéticas. - Vidrio C: De características anticorrosivas, utilizado en capas de materiales que necesitan dicha protección. - Vidrio AR: Desarrollado especialmente para reforzar el concreto, ofrece una alta resistencia para compuestos alcalinos durante el sacado, además de brindar una alta resistencia a la tensión, será este tipo de fibra la utilizada en el análisis práctico (p. 16).

De esta afirmación, se desprende la existencia de vidrios con propiedades particulares como el tipo C, que posee características anticorrosivas, necesarias en la industria de la construcción, debido a que muchas de las estructuras están expuestas al contacto con el oxígeno, lo que origina la oxidación del metal. Asimismo, se observa el vidrio AR, que se utiliza para reforzar el concreto.

Tabla 4. Características de los tipos de fibra de vidrio.

Designación	Característica	SiO ₂	Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	otros
Vidrio A	sosa común-cal sílice	72	<1	10	-	14	-	3
Vidrio AR	Resistente al álcali (para reforzado de concreto)	61	<1	5	<1	14	3	15
Vidrio C	Resistente a la corrosión química	65	4	13	3	8	2	5
Vidrio E	Composición eléctrica	54	15	17	5	<1	<1	7
Vidrio S	Alta resistencia y módulo	65	25	-	10	-	-	-

Fuente: (Escamilla y Loza, 2004, pág. 2)

2.1.1.2 Ventajas y desventajas de la fibra de vidrio.

Todos los materiales debido a su composición y estructura poseen ventajas y desventajas al ser utilizados en diferentes ámbitos. Escamilla y Loza (2004), entre las principales ventajas para el uso de las varillas GFRP se encuentran su resistencia a la corrosión producida por el álcali, también es resistente a los ataques químicos, su transparencia a las ondas electromagnéticas, baja conductividad tanto eléctrica como térmica y por último su ligereza lo cual implica una mayor manejabilidad en obra (p. 4).

Se puede decir, que posee propiedades muy versátiles que se convierten en ventajas al momento de seleccionarlo para su uso. Dentro de las más relevantes para la ingeniería civil, están resistencia a la corrosión, la ligereza y manejabilidad. Sin embargo, también existen desventajas al utilizar la fibra de vidrio en diversos contextos. De acuerdo con Escamilla y Loza (2004):

Al igual que todos los materiales las varillas GFRP también tienen sus desventajas entre las que se encuentran. Baja resistencia a la tensión en su sentido transversal, no presenta etapa elástica antes del punto de ruptura, alto coeficiente de expansión térmica en su sentido transversal, bajo módulo de elasticidad por lo tanto poca ductilidad además de que en los dobleces la resistencia disminuye considerablemente (p. 4).

Entonces, antes de seleccionar los materiales se debe indagar las ventajas y desventajas de los materiales a utilizar, teniendo presente todos aquellos aspectos como la elasticidad, resistencia, capacidad de expandirse y elasticidad. Por sus propiedades, la fibra de vidrio se utiliza cada vez más en la ingeniería civil, por su bajo costo entre otras propiedades como resistencia y peso.

2.1.1.3 Propiedades de las varillas corrugadas en fibra de vidrio.

En el ámbito de la construcción, cada día surgen nuevas alternativas, en temas de materiales, más versátiles, resistentes, económicos, entre otros. Es así como la fibra de vidrio entra en la construcción de obras, como una alternativa que ofrece una gran cantidad de ventajas. De acuerdo con Lalvay (2017): “Es un material sumamente novedoso que en los últimos años muchos profesionales están utilizando, como refuerzo de las construcciones, esto debido a que el costo del acero cada día aumenta” (p. 15). En relación a las propiedades, se puede afirmar que dependerán en gran medida, del proceso de producción motivado a que, dependiendo de él, surgen las propiedades.

2.1.1.4 Propiedades físicas de las varillas corrugadas en fibra de vidrio.

Antes de hablar de las propiedades físicas de la varilla, es oportuno mencionar que según Escamilla y Loza (2004): “Las varillas GFRP son fabricadas siguiendo las características comunes ya conocidas de las varillas de acero para refuerzo de las estructuras de concreto, es decir tienen las mismas configuraciones de corrugación y los mismos diámetros nominales” (p. 3). es decir, sigue los mismos estándares de elaboración y por ende calidad, garantizando su elaboración final.

Se puede entender que los materiales en estado sólido, posee una medida de densidad, que permite verificar su estado compromiso en un espacio determinado. De acuerdo con Escamilla y Loza (2004): una de las propiedades físicas de las varillas corrugadas en fibra de vidrio es:

La densidad las varillas GFRP tienen una densidad específica de $1250 - 2100 \text{ kg/m}^3$ es por eso que son cuatro veces más ligeras que el acero el cuál pesa 7900 kg/m^3 . Debido al bajo peso que tienen, los costos de transporte disminuyen considerablemente además de que su manejabilidad en obra se facilita (p. 4).

La densidad de la fibra de vidrio se convierte en una ventaja, al momento de reducir costos y manejabilidad de materiales en la obra.

2.1.1.5 Propiedades mecánicas de las varillas corrugadas en fibra de vidrio.

En relación a las propiedades mecánicas de las varillas corrugadas en fibra de vidrio, se puede decir que varían de un producto a otro, debido a que deben considerarse aspectos como el tipo de fibra, resina, orientación; de igual forma, el control de calidad que se realice al momento de la fabricación, entre otros temas a considerar en el proceso. Todos estos elementos cumplen un rol fundamental en el resultado final del producto elaborado. De acuerdo con Escamilla y Loza (2004), la resistencia a la tensión esta “Dentro de las propiedades mecánicas más importantes se encuentra el módulo de elasticidad el cual tiene un valor de 116600 kg/cm², que a diferencia del acero este es mucho más bajo” (p. 4). Asimismo, deben considerarse otros aspectos como los mencionados por Escamilla y Loza (2004), el comportamiento a tensión de las varillas GFRP se caracteriza por tener una relación elástica lineal en el diagrama esfuerzo deformación, hasta que el material falla. Este hecho tiene una importancia enorme ya que al no tener un comportamiento plástico el material no fluye, es decir que no se deforma con incremento en la carga aplicada y como consecuencia no se tiene un aviso momentos antes de que falle el elemento (p. 4).

Estas propiedades mecánicas permiten comprender el nivel de resistencia de un material, basándose en cálculos que pueden predecir el comportamiento de un material al ser sometido a una diversidad de condiciones específicas.

En este orden de ideas, se habla de la resistencia a la compresión que de acuerdo con Lalvay (2017), “La varilla de fibra de vidrio no presenta una buena resistencia del 40% al 60% de la resistencia a la tensión; lo que nos lleva a destacar su aportación a la compresión dentro de un elemento estructural” (p. 19). También, Escamilla y Loza (2004), señalan “A

diferencia del esfuerzo a tensión, el esfuerzo a compresión es muy bajo, en estudios éste ha llegado a ser del 55% del esfuerzo a tensión por lo que no se recomienda su utilización como refuerzo a compresión” (p. 4).

En relación a la fatiga, Escamilla y Loza como se cita en Lalvay (2017): “La fatiga dinámica es cuando el esfuerzo aplicado no es mayor del 50% de su resistencia a rotura, y se encuentra actuando en el mismo sentido que la matriz, el comportamiento bajo carga dinámica es óptimo” (p. 19). Lo que implica que tiene en los ensayos investigativos resultados que pueden considerarse positivos. De igual forma, en el módulo de elasticidad de acuerdo con Escamilla y Loza (2004):

La fibra de vidrio según estudios realizados presenta un comportamiento elástico lineal hasta su falla o rotura y que su módulo de elasticidad es menor a la del acero, lo que significa que no hay aviso momentos antes de que falle el elemento estructural (p. 19).

La elasticidad forma parte importante de las propiedades que se deben evaluar en un material, más aún en el área de la ingeniería civil. Para determinar la elasticidad se incrementa la tensión, por medio del ensayo de tensión, para medir la deformación longitudinal.

2.1.1.6 Propiedades térmicas de las varillas corrugadas en fibra de vidrio.

Las propiedades térmicas de acuerdo con los resultados de los ensayos realizados por Escamilla y Loza (2004), a causa de que el producto es anisótropo el coeficiente de expansión térmica longitudinal está dominado por las propiedades de las fibras mientras que el coeficiente de expansión térmica transversal es dominado por las propiedades de la resina. El valor de este coeficiente varía para su dirección axial y radial con los siguientes valores promedio; Dirección longitudinal: $6-10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, Dirección transversal: $21-23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ” (p. 3).

Desde esta perspectiva, se debe considerar que la propiedad de variabilidad del material en sí mismo, donde las cualidades se modifican según la dirección en que son examinadas, puede ser una limitante. Sin embargo, los autores muestran valores promedios que pueden ser utilizados en el área de la ingeniería.

2.1.1.7 Proceso de producción de las varillas corrugadas en fibra de vidrio.

La producción de vigas corrugadas, va hoy día en aumento, para Vidaud y Vidaud (2014), esto guarda relación con el hecho de que:

Son productos que cada día demuestran ser la solución por varios aspectos, entre los que sobresalen: ligereza, resistencia a la corrosión, excelente resistencia a la tensión, y elevado desempeño mecánico; sin dejar a un lado las similares condiciones de instalación si se comparan con las varillas de acero, y las ventajas presentes en su manipulación y almacenamiento. (p. 34).

Estas características particulares, hacen que este material se considerados por su ligereza, alta resistencia y su capacidad a no ceder ante la corrosión. El proceso de elaboración de este material se conoce como pultrusión. De acuerdo con Vidaud y Vidaud (2014), “Las propiedades de estos compuestos son el resultado de una combinación de materiales en los elementos de FRP que incluye entonces: fibras (refuerzos), resinas (polímeros), rellenos, y aditivos” (p.34). Existen una variedad de elementos que deben ser considerados, al momento de elaborar este material.

Otro elemento a tomar en cuenta según Vidaud y Vidaud (2014), es el recubrimiento, en tal sentido:

El recubrimiento de estos elementos se realiza a base de arena sílica; lo que proporciona un incremento en la adherencia una vez ahogada la varilla en el concreto. La arena sílica, fijada por medio de un proceso de fusión, rodea en su totalidad a la superficie

de la varilla, y al estar ahogada en el concreto se integra con el mismo; ofreciendo como resultado una extraordinaria adherencia (p. 34).

Los procesos atenderán a los estándares de calidad de elaboración y a la utilización final del material, de allí se debe tener presente si es de alta resistencia, pues su elaboración incorporar otros elementos. En palabras de Vidaud y Vidaud (2014), en el caso de las fibras de vidrio de alta resistencia, suele utilizarse una resina vinilester (resina con buenas propiedades de aislamiento térmico y eléctrico, muy resistente a la corrosión, que soporta altas temperaturas y con buen desempeño ante la fatiga); las fibras de vidrio ofrecen resistencia mecánica a la varilla, de la misma manera en que la resina concede una elevada resistencia a la corrosión en ambientes agresivos (resistencia química).

Evidentemente, la resistencia dependerá de los elementos adicionales que se utilicen en la producción del material, en este caso varillas corrugadas en fibra de vidrio de alta resistencia. Finalmente, es necesario destacar algunas propiedades de estas varillas que pueden en gran medida servir de guía al momento de seleccionarlo como posible material en una obra estructural, según Vidaud y Vidaud (2014), estas varillas no se oxidan, incluso en ambientes agresivos; tampoco reaccionan con las sales u otras sustancias presentes en el concreto. Si estos refuerzos resultan entonces resistentes al fenómeno de la corrosión, puede deducirse de esta ventaja que se reducen considerablemente con su empleo, los costos de mantenimiento (p. 34).

Sin duda, las ventajas de utilizar este material son muchas, en sitios de alto nivel de salinidad, es importante considerar la corrosión de los materiales. A continuación, se muestra una imagen que resume el proceso de pultrusión de la fibra de vidrio.



Figura 3. Proceso de pultrusión para la fabricación de los FRP con fibra de vidrio.

Fuente: (Vidaud y Vidaud, 2014, p.34).

2.1.1.8 Diseño de vigas con GRFP.

De acuerdo al American Concrete Institute [ACI] (2015), el diseño de vigas de concreto reforzada con GRFP es análogo al diseño de aquellas reforzadas con acero; así lo demuestran los datos de experimentos previos al observarse que la capacidad de flexibilidad de las vigas reforzadas con concreto puede ser calculada en base a supuestos similares de aquellas reforzadas con acero. Las secciones de concreto reforzadas con acero son comúnmente diseñadas para mantener la tensión al ceder el acero antes de la trituración del hormigón. La agregación del acero provee ductilidad y una alerta ante fallas de la viga.

De esta manera, si se rompe el refuerzo de FRP, la falla en la viga es repentina y catastrófica; sin embargo, se presenta una advertencia en forma de grietas extensas y grandes deflexiones, debido al alargamiento significativo que experimenta el refuerzo de FRP antes de la ruptura. En cualquier caso, la viga no exhibirá ductilidad como se observa comúnmente en las vigas de concreto controlados por tensión reforzados con barras de refuerzo de acero, en las cuales las barras exhiben deformación plástica antes de la trituración del concreto (ACI, 2015).

El comportamiento controlado por compresión es un poco más deseable para las vigas de flexión reforzadas con barras de FRP. Visto que, al experimentar un aplastamiento, el concreto, antes de la evidente ruptura de la tensión del refuerzo de FRP, se percibe algún

comportamiento inelástico antes del fallo. De esta manera, señala el ACI (2015) que, tanto las secciones controladas por compresión como por tensión, son aceptables en el diseño de elementos de flexión con barras de FRP, siempre que se cumplan los criterios de resistencia y capacidad de servicio. Para compensar la falta de ductilidad, la viga debe poseer una mayor reserva de fuerza. El margen de seguridad sugerido por esta guía contra fallas es, por lo tanto, más alto que el utilizado en el diseño tradicional de concreto reforzado con acero.

El uso de concreto de alta resistencia permite un mejor uso de las propiedades de alta resistencia de las barras de FRP y puede aumentar la rigidez de la sección agrietada, pero la fragilidad del concreto de alta resistencia, en comparación con el concreto de resistencia normal, puede reducir la deformabilidad global del elemento de flexión (ACI, 2015).

Finalmente, siguiendo a ACI (2015), los cálculos de la resistencia de las secciones transversales deben realizarse en base a los siguientes supuestos:

- La deformación en el concreto y el refuerzo de FRP es proporcional a la distancia del eje neutro (una sección plana antes de la carga permanece plana después de la misma).
- Se supone que la tensión de compresión máxima utilizable en el hormigón es de 0.03.
- Se ignora la resistencia a la tensión del hormigón.
- El comportamiento de tensión del refuerzo de FRP es linealmente elástico hasta el fallo.
- Existe una unión perfecta entre el hormigón y el refuerzo de FRP.

2.1.2 El acero.

En términos generales se puede decir, que el acero es un metal compuesto por aleaciones de hierro y otros componentes que, en gran medida, determinan las características mecánicas del mismo. De acuerdo con Harmsen (2002): “El acero es una aleación de diversos elementos entre ellos: carbono, magnesio, silicio, cromo, níquel y vanadio. El carbono es el más importante y el que determina sus propiedades mecánicas” (p. 36). En

efecto, dependiendo de la finalidad de uso, el acero adquiere características específicas.

Es preciso mencionar que, motivado a sus características particulares, el acero se utiliza en muchas áreas, dentro de las cuales se pueden mencionar: construcción de edificaciones, herramientas, maquinarias, industria automotriz entre otros. Es importante mencionar, De acuerdo con Harmsen (2002):

El acero para ser utilizado en concreto armado es fabricado bajo las normas, ASTM-A- 615/615M-00, y A-706/706M-00. En el Perú es producido a través de la palanquilla, pero en el extranjero también se suele conseguir el reciclaje de tren y ejes usados. Estos últimos son maleables, más duros y quebradizos (p. 36).

Existen entonces, ciertas características del acero que atienden a las exigencias de internacionales y nacionales, garantizando que la resistencia, flexibilidad y tensión sea la requerida de acuerdo a la utilización que se le asigne.

2.1.2.1 Varillas corrugadas de acero.

En el área de la construcción el acero se utiliza en muchas formas, una de las más comunes es corrugado, la forma corrugada de las varillas atiende a la necesidad de hacerlo más adherente al concreto que lo rodea. De acuerdo con Harmsen (2002):

Las varillas corrugadas son de sección circular y, como su nombre lo indica, presentan corrugaciones en su superficie para favorecer la adherencia con el concreto. Estas corrugaciones deben satisfacer los requisitos mínimos para ser tomadas en cuenta en el diseño. Existen tres cualidades distintas de acero corrugado: grado 40, grado 60 y grado 75 aunque en nuestro medio sólo se usa el segundo. Las características de estos tipos de acero se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5. Características resistentes de los aceros de 40, 60 y 75.

	f_y (Kg/cm ²)	f_s (Kg/cm ²)
Grado 40	2800	4900
Grado 60	4200	6300
Grado 75	5300	7000

Fuente: (Harmsen, 2002, p. 36)

Donde: f_y : Esfuerzo de fluencia del acero.

f_s : Resistencia mínima a la tensión a la rotura.

La presentación de las varillas corrugadas convencionales en el mercado peruano son de los siguientes diámetros 6mm, 8mm, 3/8", 12mm, 1/2", 5/8", 3/4", 1", 1 1/8" y por lo general tienen una longitud de 9 metros.

2.1.2.2 Propiedades físicas de las varillas de acero corrugado.

El acero posee múltiples propiedades, en el caso de las varillas corrugadas específicamente, se observa el diámetro nominal de la varilla, perímetro de la varilla, área de la sección transversal, peso lineal, máximo espaciamiento entre corrugaciones y cuerda de las corrugaciones. Los cuales se muestran en la siguiente figura.

Tabla 6. Varillas corrugadas y sus características.

#	d_n (in)	d_g (cm)	P(cm)	A_g (cm ²)	w(kg/m)	e(cm)	h(cm)	c(cm)	NEMP
2	1/4	0.635	2	0.32	0.250	–	–	–	
3	3/8	0.952	3	0.71	0.560	0.662	0.038	0.363	
4	1/2	1.270	4	1.29	0.994	0.888	0.051	0.485	
5	5/8	1.588	5	2.00	1.552	1.110	0.071	0.608	
6	3/4	1.905	6	2.84	2.235	1.335	0.096	0.728	
7	7/8	2.222	7	3.87	3.042	1.538	0.111	0.850	x
8	1	2.540	8	5.10	3.973	1.779	0.127	0.973	
9	1 1/8	2.865	9	6.45	5.060	2.010	0.142	1.100	x
10	1 1/4	3.226	10	8.19	6.403	2.250	0.162	1.240	x
11	1 3/8	3.580	11	10.06	7.906	2.500	0.180	1.370	
14	1 11/16	4.300	14	14.52	11.384	3.020	0.215	1.640	x
18	2 1/4	5.733	18	25.81	20.238	4.010	0.258	2.190	x

Fuente: (Harmsen, 2002, p. 37)

Es importante mencionar que, en el Perú Aceros Arequipa es una de las industrias que se dedica a este rublo, en su portal web Aceros Arequipa (2018) señala que:

El concreto es un material que resiste muy bien las fuerzas que lo comprimen. Sin embargo, es muy débil ante las fuerzas que lo estiran. Por eso, a una estructura de concreto es necesario incluirle barras de acero con el fin de que la estructura tenga resistencia al estiramiento.

Evidentemente, las construcciones de concreto armado necesitan altos estándares de calidad, partiendo de la resistencia a las fuerzas, generadas por muchos factores como sismos o peso de la misma estructura. en su portal web Aceros Arequipa (2018), las varillas "...son producidas en el país por ACEROS AREQUIPA y se venden en diferentes grosores. Las más usadas para una casa son las de diámetros de 6mm, 3/8", 1/2" y 5/8". También se fabrican en diámetros de 8mm, 12mm, 3/4", 1" y 1 3/8".

Otros aspectos a considerar son la densidad específica del acero y sus dimensiones. La densidad específica del acero es en promedio 7900 kg/m³, siendo un material pesado en grandes cantidades, para el transporte. Las características geométricas de las varillas de acero corrugado que se encuentra en el mercado peruano son los siguientes:

Tabla 7. Peso (Kg/m) Según el diámetro.

DIÁMETRO DEL FIERRO.	ÁREA NOMINAL mm ²	PESO NOMINAL kg/mt	PESO MÍNIMO* kg/mt
6 mm	28	0.222	0.207
8 mm	50	0.395	0.371
3/8"	71	0.56	0.526
12 mm	113	0.888	0.835
1/2"	129	0.994	0.934
5/8"	199	1.552	1.459
3/4"	284	2.235	2.101
1"	510	3.973	3.735
1 3/8"	1006	7.907	7.433

Fuente: portal web Aceros Arequipa (2018)

2.1.2.3 Propiedades mecánicas de las varillas del acero.

Al momento de estudiar el comportamiento mecánico de cualquier material, es necesario someterlo a esfuerzos progresivos, realizando lecturas de las variaciones que puedan presentarse. En este caso las propiedades mecánicas se centran en relación esfuerzo-deformación del acero, coeficiente de dilatación térmica y maleabilidad.

– Relación esfuerzo-deformación del acero.

El esfuerzo y deformación del acero responde a diversos ensayos que se realizan para encontrar mediciones precisas, que pueden de alguna manera a los estándares de seguridad necesarios. De acuerdo con Harmsen (2002), en la fase elástica, los aceros de distintas calidades tienen un comportamiento idéntico y las curvas se confunden. Este módulo de elasticidad es definido como la tangente del ángulo. Por lo tanto, este parámetro es independiente del grado del acero y se considera igual a (p. 39).

$$E_s = 2'039,000 \text{ kg/cm}^2$$

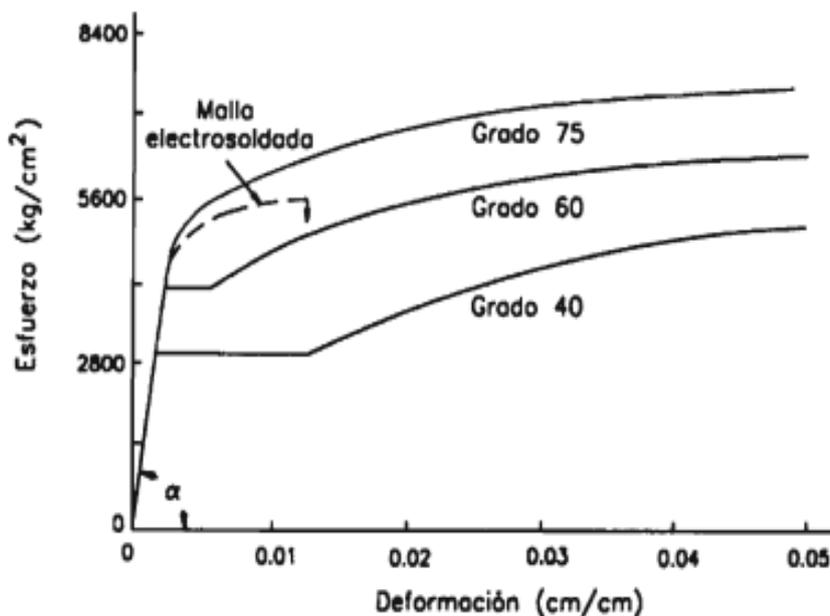


Figura 4. Curva esfuerzo-deformación y módulo de elasticidad del acero.

Fuente: (Harmsen, 2002, p. 39).

Se conoce como módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal del acero al comportamiento elástico del acero, cuando se le aplica una fuerza longitudinalmente. El acero mantiene una constante elástica entre una medida concerniente con la tensión y una medida concerniente con la deformación, dando así la estimación del módulo de elasticidad. El módulo de elasticidad del acero corrugado es igual para cualquier diámetro de la varilla.

– *Coefficiente de dilatación térmica.*

El coeficiente de dilatación térmica está relacionado con el grado de dilatación en longitud y volumen de un sólido que se somete a variaciones de temperatura. De acuerdo con Harmsen, (2002), la dilatación térmica "...es muy similar al del concreto: $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Esto es una gran ventaja pues no se presentan tensiones internas entre refuerzo y concreto por los cambios de temperatura del medio. Ambos tienden a dilatarse y contraerse de modo similar" (p.39). Es decir, los enlaces de los átomos son modificados, debido a que cuando la temperatura aumenta se expande la longitud de los enlaces.

– *Maleabilidad.*

El acero es un material que puede ser modificado sin causar daños aparentes, como grietas y fisuras, utilizando muchos procedimientos, de allí que sea necesario conocer la maleabilidad o en determinado caso la ausencia de esta. De acuerdo con Harmsen (2002), esta propiedad se garantiza a través de una prueba que consiste en doblar en frío una varilla de acero alrededor de un pin sin que ésta se astille en su parte exterior. El doblado debe ser de 90° para A- 615, A-616, A-617 y 180° para A-706 (p. 40).

Los resultados se muestran en la siguiente ilustración:

Tabla 8. Diámetros del pin para la prueba de maleabilidad del acero.

Denominacion	Diametro del pin acero A-615, A-616 y A-617	Diametro del pin acero A-706
#3, #4 y #5	3.5 d _b	3 d _b
#6, #7 y #8	5 d _b	4 d _b
#9, #10 y #11	7 d _b	6 d _b
#14 y #18	9 d _b	8 d _b

Fuente: (Harmsen, 2002, p. 39).

Donde:

d_b : Diámetro de la varilla ensayada

– *Fatiga del acero.*

En el área de ingeniería, específicamente al hablar de materiales, la fatiga hacer referencia al fenómeno en el cual los materiales se rompen más fácilmente sobre cargas estáticas. De acuerdo a Harmsen, (2002), la fatiga en el acero se presenta si el material es sometido a ciclos de cargas y descargas siempre que por lo menos uno de los límites de carga corresponda a una sollicitación de tensión. Existe un rango de variación de esfuerzos bajo el cual se puede someter indefinidamente al acero sin que pierda resistencia. Este es independiente de su esfuerzo de fluencia. Para barras rectas bajo la especificación ASTM A-615, es del orden de 1,680 kg/cm². Si se presentan dobleces o soldaduras en los puntos de máximo esfuerzos este valor se reduce en un 50%. (p. 40).

Se puede inferir que cada material presenta diferentes tipos de fatiga, uno de los más estudiado y conocido es el hacer; por tanto, se convierte en el más fiable en cuanto a predicciones se trata.

2.1.2.4 Propiedades químicas de las varillas del acero.

– Oxidación del acero.

El acero es un material con características particulares, cuando se expone al medio ambiente, se acelera su proceso de oxidación. El óxido afecta las varillas incidiendo directamente en su resistencia. El volumen del óxido es igual a siete veces el volumen del acero. De acuerdo con Harmsen (2002): “Si el refuerzo se oxida dentro del concreto, aumentará de volumen y el recubrimiento se desprenderá. Con el ingreso del oxígeno la reacción se llevará a cabo más rápidamente y la armadura terminará por corroerse totalmente” (p. 41). En efecto, el proceso de oxidación se produce con el contacto con el oxígeno, teniendo presente que el acero se oxida dependiendo del volumen.

De acuerdo a Harmsen (2002): “Si el refuerzo se oxida dentro del concreto, aumentará de volumen y el recubrimiento se desprenderá. Con el ingreso del oxígeno la reacción se llevará a cabo más rápidamente y la armadura terminará por corroerse totalmente” (p. 41). Entonces, el riesgo en la estructura será mayor debido a que los efectos afectan la estructura completa.

2.1.2.5 Proceso de producción del acero.

El proceso de producción del acero, comienza por la obtención del hierro. De acuerdo con Aceros Arequipa (2018), en su portal web “El acero nace de la fusión de diferentes cargas metálicas, con contenido de hierro, ferroaleaciones y carbono, las cuales determinan su estructura molecular, pero este proceso no es tan simple como parece”. Es decir, producir acero es un proceso complejo y dependerá de la calidad que se requiera, de allí se realizan las diferentes aleaciones o mezclas con otros componentes. Para Allauca (2011):

El hierro generalmente es encontrado en forma de óxido de hierro, magnetita, hematita, limonita, u óxidos hidratados. Se extrae del mineral por medio de los altos hornos

tal como puede volverse a fundir y colar para darle cualquier forma, o bien refinarse para transformarlo en acero o hierro forjado. Hoy en día los hornos pueden producir entre 500 y 1200 toneladas de hierro por día (p. 6).

Entonces, el primer paso es la obtener la materia prima en cualquiera de sus presentaciones, para posteriormente ser procesada, de acuerdo a Aceros Arequipa (2018), en su portal web “El proceso de producción del acero se inicia con el Proceso de Reducción Directa y el Proceso de Fragmentación de Metálicos”, evidentemente, hablan de dos métodos elementales, el de reducción directa y el de fragmentación.

Dentro de la obtención Aceros Arequipa (2018), en su portal web menciona: “Mediante el Proceso de Reducción Directa se extrae el oxígeno del mineral de hierro, obteniéndose como resultado el hierro esponja, insumo de la más alta calidad para la fabricación de nuestro acero”. Este sería el primer paso para la extraer la materia prima. Después, obtención Aceros Arequipa (2018), se realiza: “Proceso de Fragmentación de Metálicos, se procesa el acero en desuso reciclado, obteniéndose el acero reciclado fragmentado, otro de los insumos para la fabricación del acero” Finalmente, de acuerdo con Aceros Arequipa (2018):

Ambos insumos, el hierro esponja y el acero reciclado fragmentado, pasan luego a través del Proceso de Acería, donde se realiza la fusión de éstos a grandes temperaturas en nuestro horno eléctrico. Luego de 35 minutos de fusión se obtiene el acero líquido, el cual pasa luego por una etapa de "afino", en el horno cuchara, que permite que el acero alcance un mayor grado de homogeneidad y mayor calidad al momento de ajustar su composición química.

El proceso final, surge después de realizar cada etapa con rigurosidad, es pertinente mencionar que para Allauca (2011):

El hierro es un acero con alto contenido en carbono por eso se transporta cuando sale

del alto horno en vagonetas llamadas torpedos hasta el convertidor donde al hierro se le baja el contenido de carbono mediante ferroaleaciones, fundentes o chatarra; estos tres productos pueden ir directamente al convertidor para ayudar en la obtención del acero o también puede ser convertidos en acero en un horno eléctrico (p. 6).

Existen varios tipos de hornos, además de componentes con los cuales el acero puede ser mezclado para crear diferentes tipos de aleaciones, es importante determinar la utilización del acero, los estándares de calidad a nivel internacional o nacional.

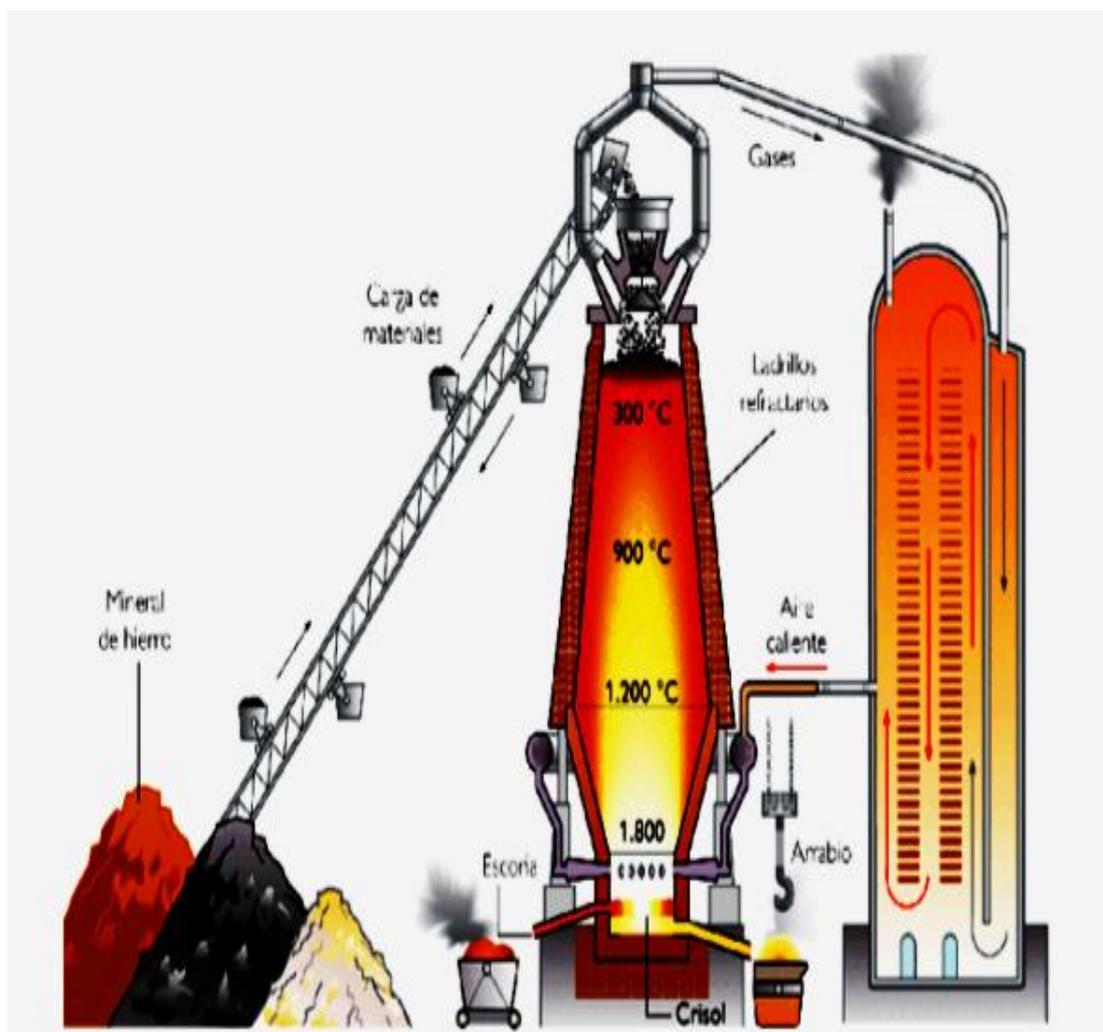


Figura 5. Diagrama del alto horno.

Fuente: (Allauca, 2011, p. 6)

2.2 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE LA INVESTIGACIÓN

En esta sección del trabajo el investigador, analiza e interpreta la información recabada. En este caso en particular se trabaja con resultados obtenidos de otras investigaciones para establecer la comparación de resultados y producir un nuevo conocimiento. Para definir las propiedades mecánicas de barras GFRP se trabajó con datos extraídos de la tesis doctoral “Diseño, según Estados Límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP” de la autora Almerich (2010).

Tabla 9. Tensión de las barras de GFRP.

TRACCIÓN				
ϕ (mm)	Resistencia (MPa)		Módulo de Elasticidad (MPa)	
	V. Medio	V. Característico	V. Medio	V. Característico
8	855,8	916,1	38276	36107
10	779,1	745,0	42634	38488
12	637,9	620,5	41125	39573
16	695,5	637,7	42477	40140
20	723,7	700,6	43590	40970
25	722,8	623,5	39929	35453
32	720,1	635,5	39681	33370

Fuente: (Almerich, 2011, p.87).

Tabla 10. Características paramétricas de las barras GFRP (en mm).

ϕ nominal	Tolerancia admisible	Diámetro equivalente	Sección transversal nominal	Sección transversal equivalente
$\phi 8$	$\pm 0,2$	7,98	50,27	50,01
$\phi 10$	$\pm 0,3$	9,99	78,54	78,38
$\phi 12$	$\pm 0,3$	11,98	113,10	112,72
$\phi 16$	$\pm 0,3$	15,98	201,06	200,31
$\phi 20$	$\pm 0,35$	19,75	314,16	306,35
$\phi 25$	$\pm 0,35$	24,75	490,87	481,11
$\phi 32$	$\pm 0,35$	31,66	804,25	787,25

Fuente: (Almerich, 2011, p.44)

Las vigas que serán estudiadas analíticamente tendrán las siguientes características.

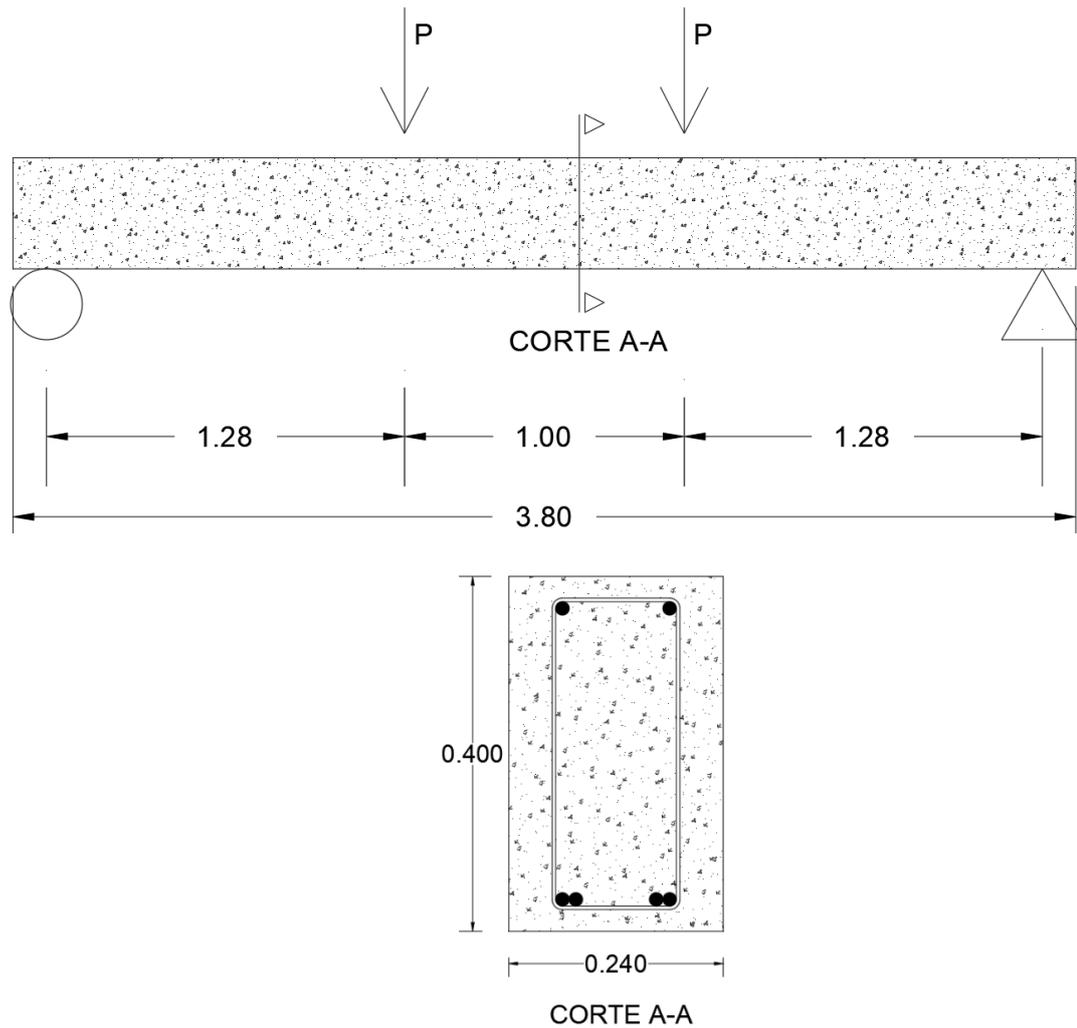


Figura 6. Características geométricas de las vigas a investigar.

Fuente: Elaboración propia (2018).

Datos del concreto

Base Superior e Inferior (b)	:	24 cm
Altura de Viga (h)	:	40 cm
Resistencia a la compresión del concreto (F'_c)	:	210 Kg/cm ²
Deformación de máx. Resistencia (ϵ'_c)	:	0.002

Los refuerzos a incorporarse en cada espécimen, serán de varillas de vidrio, acero y mixto. Considerando que la cuantía que tendrán entre ellos será muy aproximada, así nos

permitirá realizar la comparación en su diagrama curvatura, ductilidad, deflexión y esfuerzos de compresión y tensión.

Los refuerzos a incorporarse en cada espécimen, lo explicamos a continuación:

– **Primer Espécimen.**

1 viga con refuerzos de acero de 5/8", cuatro varillas como refuerzo de tensión y dos varillas como refuerzo de compresión.

– **Segundo espécimen.**

1 viga con refuerzos de GFRP de 16mm, cuatro varillas como refuerzo de tensión y dos varillas como refuerzo de compresión.

– **Tercer espécimen.**

1 viga con refuerzos combinados de acero y GFRP, de 5/8" y 16mm respectivamente, cuatro varillas de GFRP como refuerzo de tensión y dos varillas de acero como refuerzo de compresión.

Detalle de reforzamiento de cada espécimen

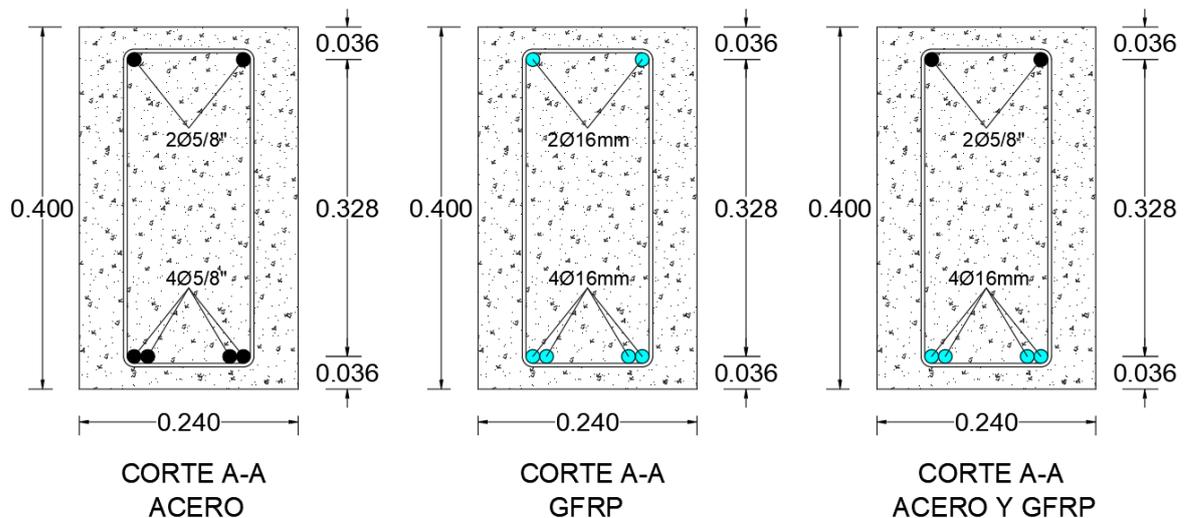


Figura 7. Cortes transversales de las vigas doblemente reforzadas.

Fuente: Elaboración propia (2018).

2.3 EVALUACIÓN DEL CASO

2.3.1 Concreto

2.3.1.1 Esfuerzo a compresión del concreto

Al hablar de esfuerzo de compresión se entiende que, se debe establecer la compresión de los materiales, de acuerdo con Pino, Beltrán y Terán (2015) la compresión se da: “cuando las fuerzas exteriores están aplicadas a lo largo del eje longitudinal del cuerpo por lo que las fuerzas interiores que aparecen estarán dirigidas a 90 grados de la sección transversal de la barra, por lo que son fuerzas normales” (p. 125).

Asimismo, señalan Pino, Beltrán y Terán (2015) las tensiones normales se determinan como: “la relación entre las fuerzas normales actuantes en cada sección y el área de dicha sección, recordando que consideraremos secciones desde el punto de aplicación de una fuerza hasta el otro, teniendo presente la variación del área de la sección transversal” (p. 125). Plantea utilizar esta fórmula:

$$\sigma_{Max} = \frac{N_{Max}}{A} \leq [\sigma]$$

Figura 8. Fórmula para determinar las fuerzas normales.

Estos mismos autores mencionan que, si las deformaciones se dan en el eje longitudinal se calcula utilizando la siguiente formula:

$$\Delta l = \sum_{i=1}^n \frac{N_i l_i}{E_i A_i}$$

Figura 9. Fórmulas para deformaciones en el eje longitudinal.

Según Pino, Beltrán y Terán (2015) ambas formulas son importantes para calcular la resistencia y rigidez además de: “calcular las fuerzas admisibles y dimensionar la sección transversal de los elementos, resolviendo de esta forma los problemas en que se enfoca la resistencia de los materiales” (p. 125).

2.3.1.2 Esfuerzo-deformación en compresión del concreto

Para determinar la curva esfuerzo – deformación (σ - ϵ) a compresión, del concreto confinado y no confinado. Diferentes autores han propuesto los siguientes modelos, como se aprecia en la figura.

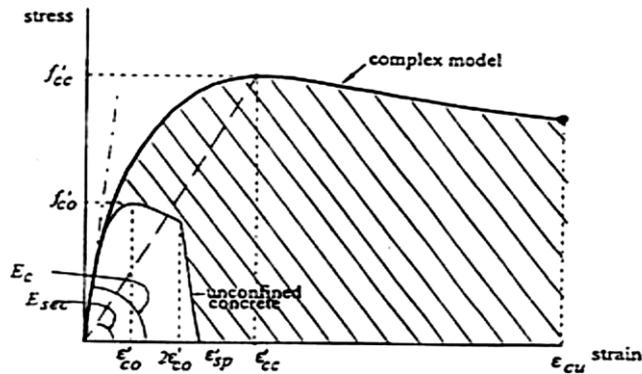


Figura 10. Modelo para concreto confinado y no confinado.

Fuente: Mander, Priestley y Park (1988).

Para poder realizar el análisis de esfuerzo-deformación del concreto en compresión, es necesario considerar esfuerzos no lineales y utilizar ecuación de una parábola de segundo grado.

La ecuación que más se aproxima a la gráfica de los ensayos a compresión realizados. Es la representada por Kend y Park, mediante la siguiente expresión.

$$f_c = f'_c \left(\frac{2\epsilon_c}{\epsilon'_c} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right)^2 \right)$$

Dónde:

f_c : Esfuerzo a compresión del concreto

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto

ϵ_c : Deformación unitaria del concreto correspondiente al esfuerzo de compresión

ϵ'_c : Deformación cuando alcanza la máxima resistencia e igual a 0.002.

Almada (2015), la curva σ - ϵ del concreto a compresión en relación a la máxima resistencia a la compresión del concreto, considerando la máxima deformación del concreto (ϵ_{cu}), igual a 0.003 en correspondencia a la sección 10.2.3 del Reglamento ACI 318S-11.

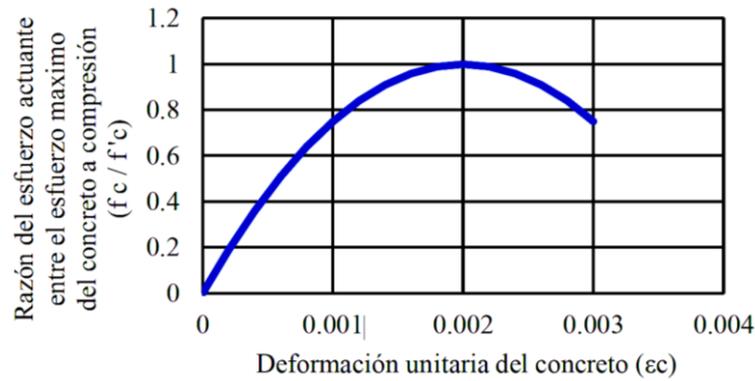


Figura 11. Curva esfuerzo - deformación del concreto a compresión.

Fuente: Almada (2015).

2.3.1.3 Fuerza de compresión del concreto y su localización.

- Fuerza de compresión

Para hallar la fuerza de compresión del concreto (C_c), realizaremos las siguientes operaciones matemáticas de acuerdo al gráfico:

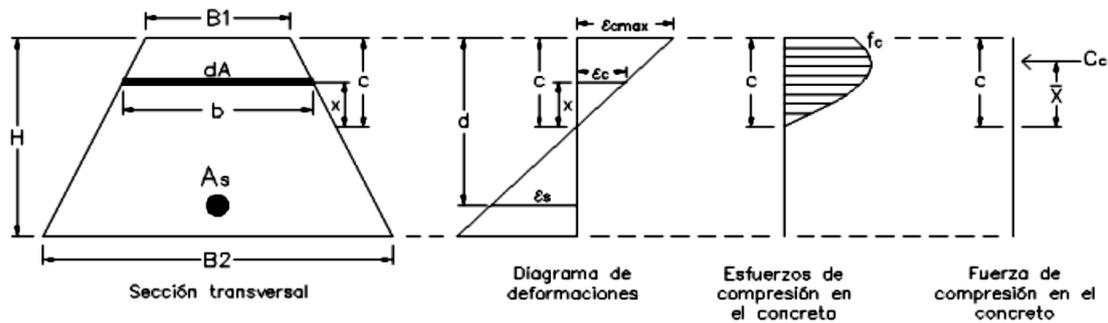


Figura 12. Fuerza de compresión del concreto

Fuente: Almada (2015).

Semejanza de triángulos

$$\frac{\epsilon_{ctmax}}{c} = \frac{\epsilon_c}{x} \rightarrow \epsilon_c = \frac{x * \epsilon_{ctmax}}{c}$$

Remplazamos ε_c en la expresión matemática de Kend y Park, así obteniendo la siguiente fórmula.

$$f_c = f'_c \left(\frac{2\varepsilon_{cmax}x}{c\varepsilon'_c} - \left(\frac{\varepsilon_{cmax}x}{c\varepsilon'_c} \right)^2 \right)$$

Del fig. 19 extraemos la diferencial (dA)

$$dA = b * dx$$

La fuerza de compresión resultante, se calcula integrando la diferencial

$$C_c = \int_0^c dF = \int_0^c dA * f_c = \int_0^c b * f_c * dx$$

El valor de “b” geométricamente de acuerdo al fig. 19

$$b = B_1 + \frac{(B_2 - B_1)}{H} (C - X)$$

Remplazando “f_c” y “b” en la integral y resolviendo el mismo, ya podemos calcular la fuerza de compresión del concreto.

$$C_c = \left(B_1 + \frac{B_2 - B_1}{H} c \right) f'_c c \left[\frac{\varepsilon_{cmax}}{\varepsilon'_c} - \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon_{cmax}}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right] - \left(\frac{B_2 - B_1}{H} \right) f'_c c^2 \left[\frac{2\varepsilon_{cmax}}{3\varepsilon'_c} - \frac{1}{4} \left(\frac{\varepsilon_{cmax}}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right]$$

- Localización de compresión \bar{X}

Para hallar la localización de la fuerza de compresión, igualaremos la diferencial de fuerza “dF” multiplicado con la distancia hacia el eje neutro “x”, con el momento que produce la fuerza resultante “dM”.

$$dM = x * dF = x * dA * f_c \rightarrow \int_0^c dM = C_c \bar{X}$$

$$\bar{X} = \int_0^c x * dA * f_c / C_c$$

Remplazando “dA”, “f_c” y “C_c” y resolviendo la integral, obtenemos la expresión matemática para localizar la fuerza de compresión.

$$\bar{X} = \frac{B_1 f'_c c^2 \left[\frac{2\varepsilon_{cmax}}{3\varepsilon'_c} - \frac{1}{4} \left(\frac{\varepsilon_{cmax}}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right] + \left(\frac{B_2 - B_1}{H} \right) f'_c c^3 \left[\frac{1\varepsilon_{cmax}}{6\varepsilon'_c} - \frac{1}{20} \left(\frac{\varepsilon_{cmax}}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right]}{\left(B_1 + \frac{B_2 - B_1}{H} c \right) f'_c c \left[\frac{\varepsilon_{cmax}}{\varepsilon'_c} - \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon_{cmax}}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right] - \left(\frac{B_2 - B_1}{H} \right) f'_c c^2 \left[\frac{2\varepsilon_{cmax}}{3\varepsilon'_c} - \frac{1}{4} \left(\frac{\varepsilon_{cmax}}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right]}$$

2.3.1.4 Esfuerzo-deformación en tensión del concreto

Almada (2015), la curva σ - ε del concreto a tensión, se obtiene graficando una distribución lineal a partir de cero hasta la deformación correspondiente al esfuerzo de ruptura (f_r) del concreto por tensión igual a 13.2×10^{-5} , la cual fue calculada como se muestra a continuación:

$$f_r = 2\sqrt{f'_c} = E_c \varepsilon_{ctmax} = (15100\sqrt{f'_c}) \varepsilon_{ctmax}$$

$$\varepsilon_{ctmax} = \frac{2}{15100} = 13.2 \times 10^{-5}$$

Donde:

E_c : Módulo de elasticidad del concreto (8.5 ACI 318S-11)

ε_{ct} : Deformación del concreto a una posición dada.

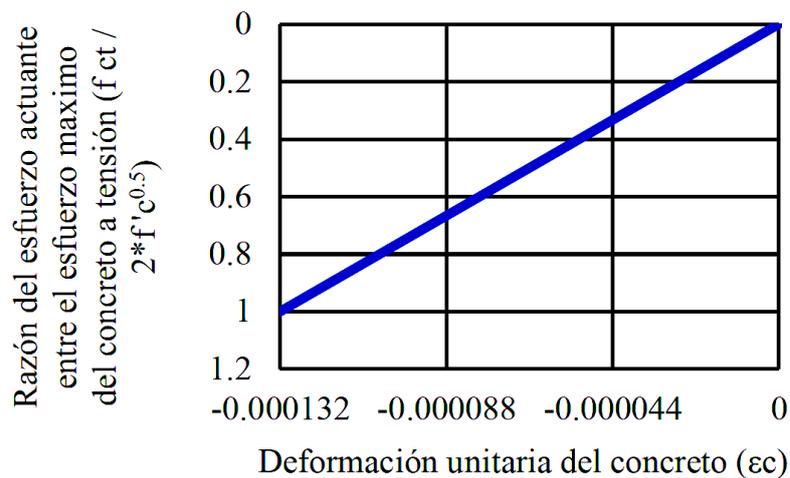


Figura 13. Curva esfuerzo - deformación a tensión del concreto
Fuente: Almada (2015).

2.3.1.5 Fuerza de tensión del concreto y su localización.

- Fuerza de tensión

Para hallar la fuerza de tensión del concreto (T_c), realizaremos las siguientes operaciones matemáticas de acuerdo al gráfico:

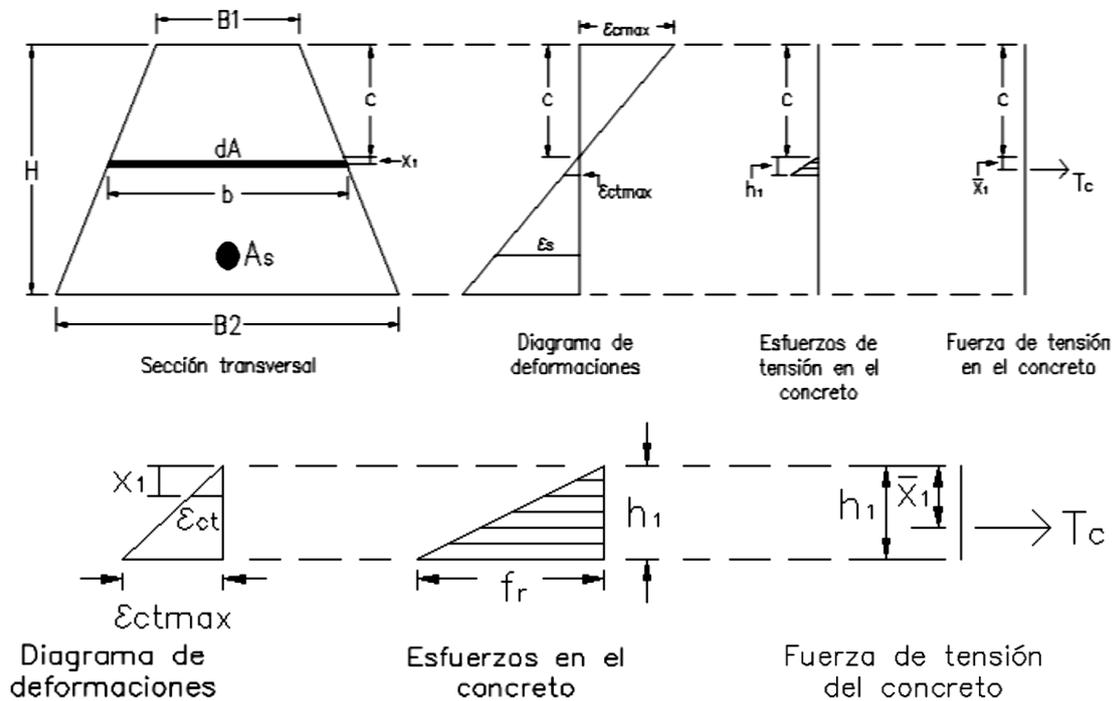


Figura 14. Fuerza de tensión del concreto

Fuente: Almada (2015).

Semejanza de triángulos

$$\frac{\epsilon_{ct,max}}{h_1} = \frac{\epsilon_{ct}}{x_1} \rightarrow \epsilon_{ct} = \frac{x_1 * \epsilon_{ct,max}}{h_1}$$

El esfuerzo a tensión esta dado por la siguiente expresión

$$f_t = E_c \epsilon_{ct}$$

Remplazando “ ϵ_{ct} ” en la expresión del esfuerzo a tensión, obtenemos

$$f_t = E_c \frac{x_1 * \epsilon_{ct,max}}{h_1}$$

Del fig. 21 extraemos la diferencial (dA)

$$dA = b * dx_1$$

El valor de “ b ” geoméricamente de acuerdo al fig. 19

$$b = B_1 + \frac{(B_2 - B_1)}{H}(C + x_1)$$

Remplazamos “b” en la diferencial obtenemos.

$$dA = \left[B_1 + \frac{B_2 - B_1}{H}(c + x_1) \right] dx_1$$

La diferencial de fuerza “dF” obtenemos multiplicando la diferencial “dA” con el esfuerzo a tensión “f_t”

$$dF = dA * f_t$$

$$dF = \left[B_1 + \left(\frac{B_2 - B_1}{H} \right) (c + x_1) \right] E_c \frac{x_1 * \varepsilon_{ct,max}}{h_1} dx_1$$

$$dF = \frac{f_r}{h_1} \left[B_1 x_1 + \left(\frac{B_2 - B_1}{H} \right) (c x_1 + x_1^2) \right] dx_1$$

La fuerza de tensión hallaremos integrando la diferencial de fuerza, desde el eje neutro, hasta la ubicación de la máxima deformación ($\varepsilon_{ct,max}$), denominando a esa distancia “h₁”

$$T_c = \int_0^{h_1} \frac{f_r}{h_1} \left[B_1 x_1 + \left(\frac{B_2 - B_1}{H} \right) (c x_1 + x_1^2) \right] dx_1$$

$$T_c = f_r \left[B_1 \frac{h_1}{2} + \left(\frac{B_2 - B_1}{H} \right) \left(\frac{c h_1}{2} + \frac{h_1^2}{3} \right) \right]$$

- Localización de Fuerza Tensión (\bar{X}_1)

Para hallar la localización de la fuerza de tensión, igualaremos la diferencial de fuerza “dF” multiplicado con la distancia hacia el eje neutro “x₁”, con el momento que produce la fuerza resultante “dM”.

$$x_1 dF = dM \rightarrow \int_0^{h_1} dM = T_c \bar{X}_1$$

Remplazando “dM” y “T_c” para luego resolver la integral, obteniendo la expresión matemática para localizar la fuerza de tensión.

$$\int_0^{h_1} x_1 \left\{ \frac{f_r}{h_1} \left[B_1 x_1 + \left(\frac{B_2 - B_1}{H} \right) (c x_1 + x_1^2) \right] dx_1 \right\} = T_c \bar{X}_1$$

$$\frac{f_r}{h_1} \left[B_1 \frac{h_1^3}{3} + \left(\frac{B_2 - B_1}{H} \right) \left(\frac{c h_1^3}{3} + \frac{h_1^4}{4} \right) \right] = T_c \bar{X}_1$$

$$\bar{X}_1 = \frac{\left[B_1 \frac{h_1^3}{3} + \left(\frac{B_2 - B_1}{H} \right) \left(\frac{c h_1^3}{3} + \frac{h_1^4}{4} \right) \right]}{\left[B_1 \frac{h_1}{2} + \left(\frac{B_2 - B_1}{H} \right) \left(\frac{c h_1}{2} + \frac{h_1^2}{3} \right) \right]}$$

2.3.2 Acero o GFRP

2.3.2.1 Esfuerzo-deformación

Almada (2015), la curva σ - ϵ del acero para tensión y compresión se simplifica a una curva bilineal, fig. 15, con las ecuaciones presentadas en la tabla 1, donde ϵ_y (deformación del acero cuando empieza a fluir) y f_y el esfuerzo correspondiente, ϵ_r (deformación del acero al momento de falla), E_s (módulo de elasticidad del acero) y ϵ_s (la deformación del acero).

TABLA 1.
ECUACIONES DE LA CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.

Rango	Ecuación
Falla por compresión ($-\epsilon_r$) hasta $-\epsilon_y$	$\sigma = -f_y$
De $-\epsilon_y$ a ϵ_y	$\sigma = E_s \epsilon_s$
De ϵ_y a la falla en tensión (ϵ_r)	$\sigma = f_y$

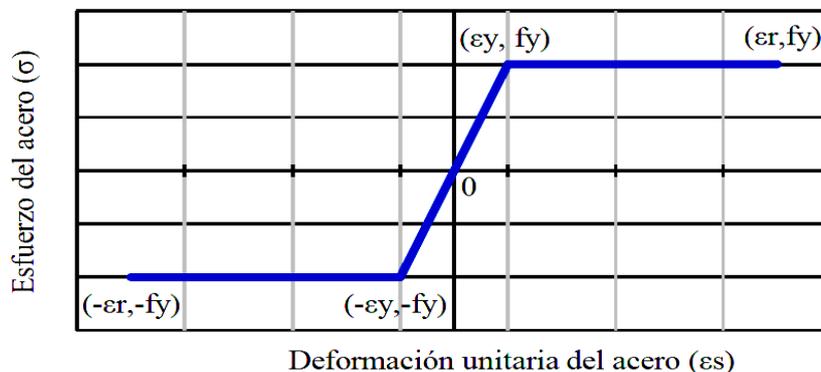


Figura 15. Aproximación de la curva esfuerzo - deformación del acero.
Fuente: Almada (2015).

2.3.2.2 Fuerza de compresión y tensión

Para calcular la fuerza de tensión y compresión del acero o GFRP, emplearemos la siguiente expresión matemática.

$$F_s = A_s \varepsilon_s E_s \leq A_s f_y$$

Donde:

F_s : Fuerza de tensión o compresión del acero o GFRP

A_s : Área del acero o GFRP

ε_s : Esfuerzo unitario del acero o GFRP

E_s : Modulo de elasticidad del acero o GFRP

La fuerza resultante se ubica en el centroide de las varillas.

2.3.3 Diagrama momento curvatura

En relación al momento de curvatura de acuerdo con Quiroz (2015): “Las relaciones de esfuerzo-deformación para el uso y el uso se utilizan para entender el comportamiento a flexión de secciones de vigas rectangulares. Se analizará el efecto de los cambios en la propiedad, la materia y la acción sobre el comportamiento y la flexión” (p. 2). Es decir, la curvatura permite evidenciar las variaciones del material. Asimismo, Almada (2015) señala que:

Teniendo las ecuaciones correspondientes para determinar la fuerza de compresión y tensión de los materiales, tanto del concreto como del acero, así como su localización, se procede a buscar la posición del eje neutro que cumpla con el equilibrio interno, es decir que la suma de fuerzas internas sea cero (p. 4).

Además, agrega Almada (2015) que: El momento resistente se determina utilizando la siguiente expresión matemática.

$$M = C_c(d - c + \bar{X}) + C_s(d - d') - T_c(d - c + \bar{X}_1)$$

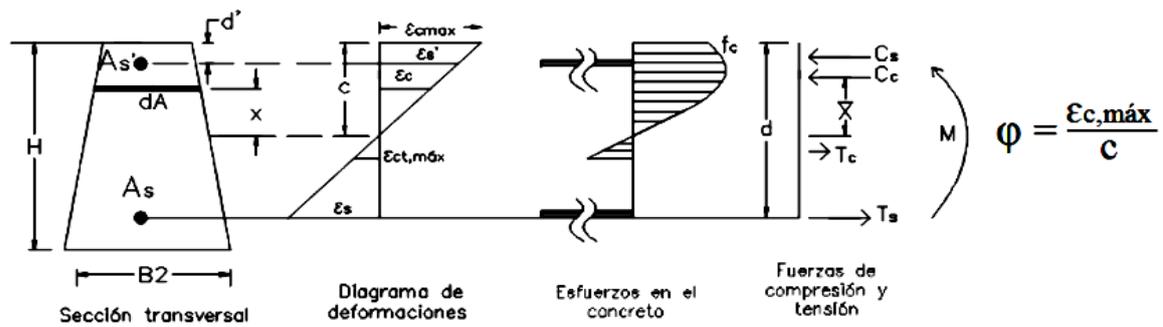


Figura 16. Esquema para determinar el momento de curvatura

Fuente: Almada (2015).

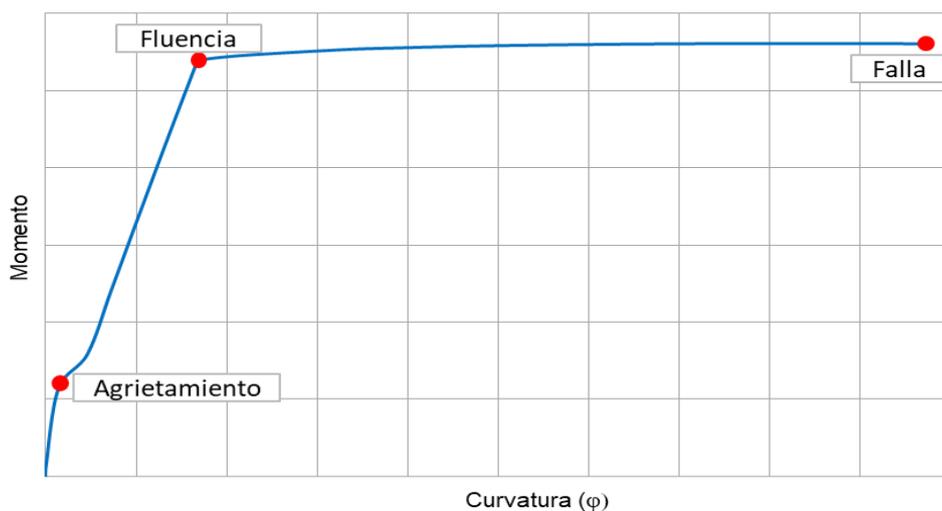


Figura 17. Gráfico Momento-Curvatura de una sección transversal de concreto reforzado con acero.

Fuente: Elaboración propia (2018).

2.3.4 Ductilidad

De acuerdo con Fernández (2012): “La ductilidad se puede considerar como la capacidad que tiene un material para deformarse permanentemente, antes de alcanzar su rotura, y se expresa por medio del alargamiento o por la reducción de sección, generalmente no en valores absolutos sino relativos” (p. 133). En síntesis, la deformación progresiva del material, en forma permanente.

$$\phi = \frac{\epsilon_{c,máx}}{c}$$

2.3.5 Deflexión de viga

De acuerdo con González y Robles (2005): “El cálculo de la deflexión tiene dos aspectos. Por un lado, es necesario calcular las deflexiones de los miembros estructurales bajo cargas y condiciones ambientales conocidas; por otro, deben establecerse criterios sobre límites aceptables de deflexiones” (p. 339).

Es pertinente mencionar que, de acuerdo con González y Robles (2005): existen muchas variables que inciden en el punto de deflexión, de acuerdo con los principales son:

- a) Resistencia a la tensión del concreto. A mayor resistencia, menores deflexiones, porque es mayor la zona que tiene grietas y es mayor la contribución al momento resistente del concreto a tensión.
- b) Módulo de elasticidad del concreto. A mayor módulo, menores deflexiones, porque las deformaciones unitarias y, por consiguiente, las curvaturas, son menores.
- c) Porcentaje de refuerzo a tensión. A menor porcentaje, mayores deflexiones, porque los esfuerzos y deformaciones unitarias en el concreto y en el acero son mayores.
- d) Agrietamiento del elemento. A mayor agrietamiento, mayores deflexiones, porque los picos de curvatura son mayores (p. 342).

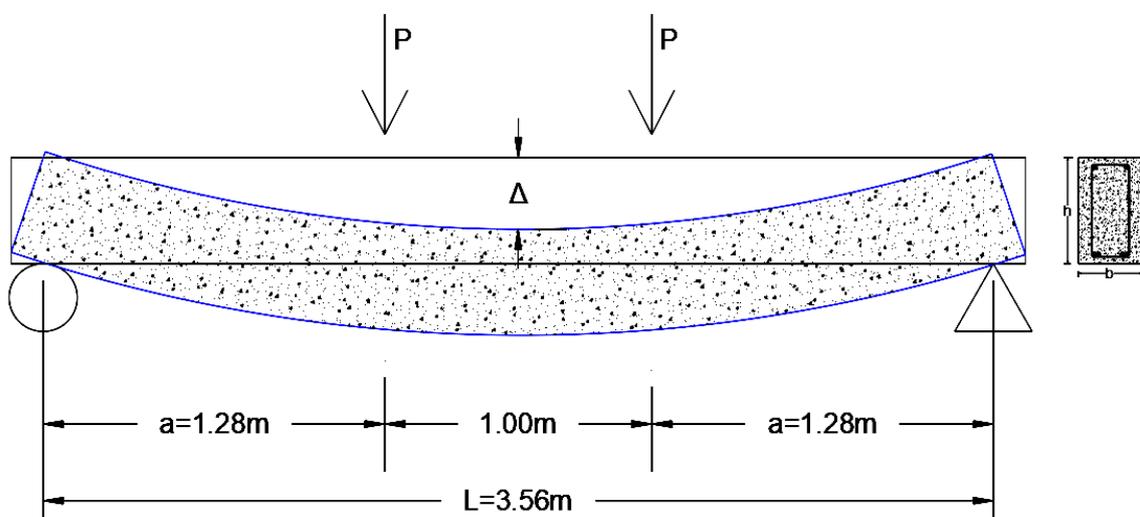


Figura 18. Gráfico de deflexión de viga simplemente apoyada

Fuente: Elaboración propia (2018).

Para calcular la deflexión de la viga simplemente apoyado con el diagrama momento curvatura emplearemos las siguientes expresiones matemáticas.

$$\text{Ecuación de Branson: } I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g$$

Donde:

I_e : Momento de inercia efectivo o reducido

I_g : Momento de inercia de la sección transversal total del concreto

I_{cr} : Momento de inercia de la sección transformada del concreto totalmente agrietada

M_{cr} : Momento de agrietamiento de la viga

M_a : Momento máximo que actúa en el claro simple

Branson recomienda usar la ecuación en miembros de concreto presforzado, cargados en el rango de agrietamiento.

En la viga podemos apreciar que la ecuación de deflexión, será la suma de la deflexión producida por la fuerza de su propio peso (carga distribuida “q”) y la producida por la fuerza aplicada (carga puntual “P”). Así teniendo la ecuación de deflexión total para nuestro análisis.

$$\Delta = \frac{5}{384} q \frac{L^4}{EI_e} + \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{24EI_e}$$

Donde:

Δ : Deflexión de la viga

P: Carga Aplicada

L: Distancia Total entre los apoyos

a: Distancia de un apoyo a la carga aplicada “P”

q: Peso propio del concreto por metro lineal

E: Modulo de eslasticidad del refuerzo

I_e : Momento de inercia efectivo o reducido

CAPÍTULO III. METODO

Es pertinente mencionar que el enfoque del estudio es cuantitativo, motivado a que los datos del mismo son medibles en forma numérica. El diseño en la investigación hace referencia a la forma en que el investigador abordara la situación o problema, de allí que esta investigación se ubica en un estudio de diseño no experimental. De acuerdo con Carrasco (2017): “Son aquellas cuyas variables independientes carecen de manipulación intencional, y no poseen grupo control, ni mucho menos experimental. Analizan y estudian los hechos y fenómenos de la realidad después de su ocurrencia” (p. 71).

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación es de tipo básica, la cual de acuerdo con Carrasco (2017), el cual tiene dentro de sus propósitos: “ampliar y profundizar el caudal de conocimientos científicos existentes acerca de la realidad. Su objeto de estudio lo constituye las teorías científicas, las mismas que las analiza para perfeccionar sus contenidos” (p. 43). En efecto, esta investigación realizó la comparación de resultados de otros estudios científicamente comprobables y verificables.

3.2 ÁMBITO TEMPORAL Y ESPACIAL

El método a utilizar consistió en el análisis sistemático de información. Revisión bibliográfica de contenido y resultados. El criterio de inclusión se centra en estudios con reconocimiento internacional, con información relevante al tema.

3.3 VARIABLES

3.3.1 Variables independientes

Vigas reforzadas con varillas de vidrio

Vigas reforzadas con acero convencional

3.3.2 Variables dependientes

Comportamiento estructural en flexión

3.4 MUESTRA Y POBLACIÓN

“Diseño, según Estados Límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP” de la autora Ana Isabel Almerich (2010). Es pertinente resaltar que la utilización de la fibra de vidrio GFRP, es una innovación hoy en día, debido a que aún se continúa investigando en relación a las ventajas y desventajas de su uso en la construcción. Además, del aspecto antes mencionado, existen otros como aportar datos importantes del análisis de las características del comportamiento estructural a flexión de las diferentes vigas las reforzadas con varillas de vidrio frente a las reforzadas con acero.

3.5 INSTRUMENTOS

Estudios previos en relación al tema en estudio, basado en una revisión bibliográfica sistemática, en páginas como Dialnet, Google académico, biblioteca Miguel Cervantes, Renati, etc. Dentro de las investigaciones más relevantes se tiene a Almada, Bárcena y Enciso (2015), para el cálculo de momento de curvatura y Almerich (2010).

3.6 FUENTE DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para la recolección de datos se realizó una revisión de referencias bibliográficas en fuentes como: Renatí, Dialnet, Scielo, Google Académico, etc. Se tomaron en cuenta parámetros de inclusión: trabajos científicamente comprobados a nivel mundial e información que aportara datos importantes.

3.7 PROCEDIMIENTO

Los datos obtenidos de estudios previos, se tomaron como referencias para comparar sus resultados y establecer datos confiables. Asimismo, se realizaron cálculos para determinar la deflexión de viga reforzado con acero y los parámetros asociados a la viga reforzada con barras de GFRP-ACERO.

Es pertinente mencionar que se realizó el análisis de deflexión instantánea de la viga, de acuerdo a las ecuaciones de Branson. Esta ecuación brinda una deflexión muy cercana a la deflexión experimental, por lo cual ha sido incorporado en las normas de ACI.

3.8 ANÁLISIS DE DATOS

En esta parte, se realizaron tablas y gráficos que permitieron establecer parámetro de comparación. Se compraron factores como: resistencia de tensión, compresión y elasticidad de cada una de las vigas, teniendo como referencia el diámetro de las mismas.

3.9 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Las limitaciones de una investigación, dependerán de las características del estudio, el diseño y tipo; también, de otros aspectos como: lo innovador del tema, el acceso a la información, entre otros. En este estudio en particular se puede mencionar:

- Poca información de las características mecánicas de las varillas de vidrio.
- Reducida cantidad de estudios en relación al tema a nivel nacional e internacional.
- Varillas de fibras de vidrio no son fabricados en el país, y su exportación es costosa.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Seguidamente se procede hacer el análisis de flexión de la viga reforzada con acero y/o GFRP.

PRIMER ANALISIS: Viga doblemente reforzada con acero en tensión y compresión

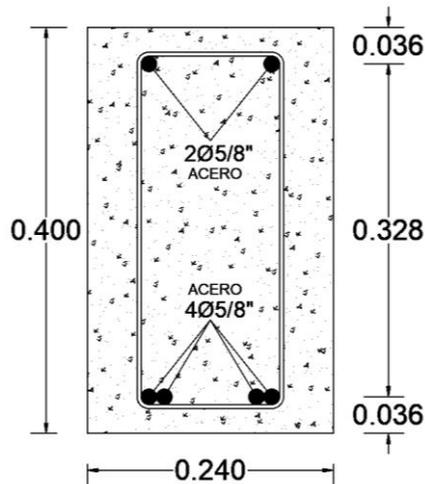


Tabla 11. Datos técnicos del concreto y del acero

Datos del Concreto	Nomenclatura	Valor	Unidad
Base Superior	B ₁	24	cm
Base Inferior	B ₂	24	cm
Altura de Viga	h	40	cm
Resistencia a la compresión del concreto	F' _c	210	Kg/cm ²
Deformación de máx. Resistencia	ε' _c	0.002	
Datos del Refuerzo (ACERO)			
Esfuerzo de Fluencia del acero	F _y	4200	Kg/cm ²
Módulo de elasticidad del acero	E _s	2100000	Kg/cm ²
Área de acero en tensión	A _s	7.96	cm ²
Área de acero en compresión	A' _s	3.98	cm ²
Prof. Efectiva del acero en tensión	d	36.40	cm
Peralte de acero a compresión	d'	3.60	cm
Recubrimiento de la parte inferior	r	3.60	cm

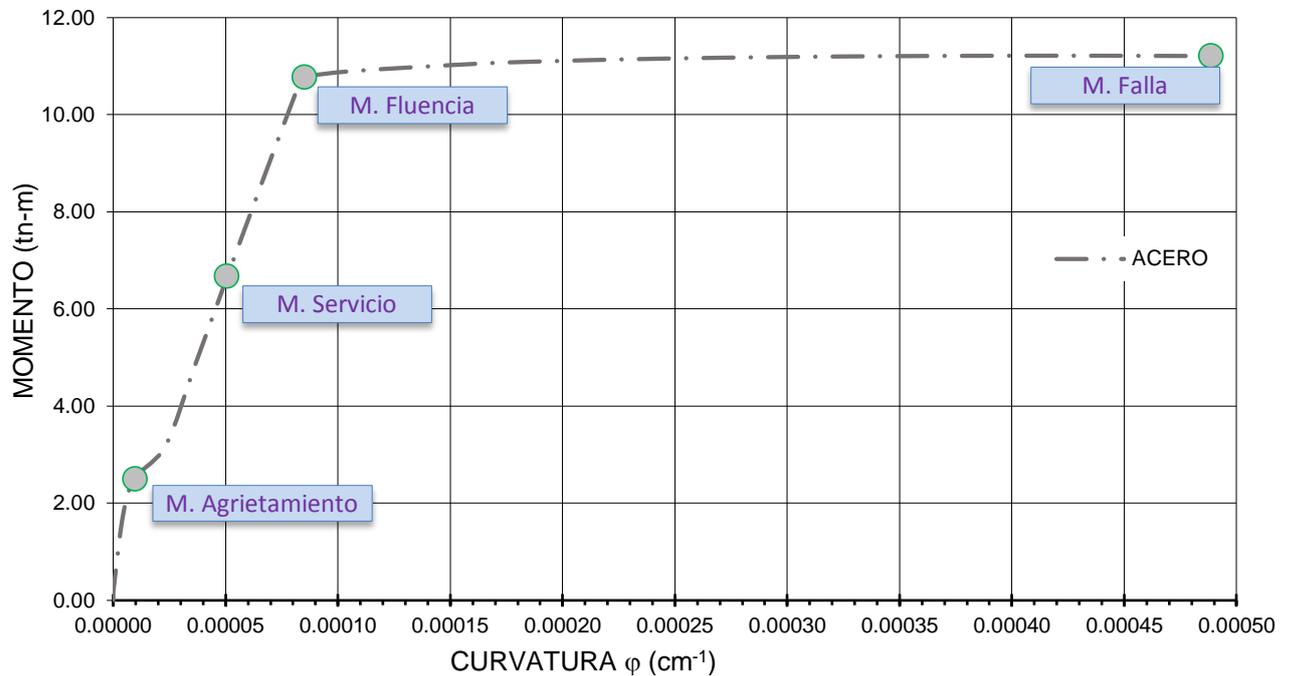
Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 12. Resultados del análisis en flexión de viga reforzada con varilla de acero.

e_{cmax}	c	Cc	Xc	h	Tc	Xt	es	fs	Fs	es'	fs'	Fs'	Cc-Tc-(Fs-Fs')=0	M(kg-cm)	Curvatura
0.00000	0.0000	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.0000	0.000000	0.00	0.00	0.00000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00000
0.00001	37.0910	933.14	24.7222	2.9090	1011.72	1.9393	0.000000	-0.39	-3.11	0.00001	18.96	75.47	0.00	27560.86	0.00000
0.000146	20.5330	7351.22	13.6461	18.6145	6473.98	12.4096	0.000113	236.29	1880.83	0.00012	252.16	1003.60	0.00	227492.44	0.00001
0.00030	12.9217	9280.33	8.5578	5.6855	1977.39	3.7904	0.000545	1144.70	9111.78	0.00022	454.48	1808.83	0.00	317704.63	0.00002
0.00045	12.4527	13062.27	8.2177	3.6528	1270.42	2.4352	0.000865	1817.29	14465.64	0.00032	671.81	2673.79	0.00	480518.19	0.00004
0.00060	12.3810	16848.03	8.1393	2.7238	947.32	1.8159	0.001164	2444.39	19457.36	0.00043	893.63	3556.65	0.00	637429.96	0.00005
0.00075	12.4147	20530.79	8.1287	2.1850	759.92	1.4567	0.001449	3042.92	24221.63	0.00053	1118.28	4450.77	0.00	788190.27	0.00006
0.00090	12.4909	24079.88	8.1436	1.8320	637.15	1.2213	0.001723	3617.71	28796.95	0.00064	1345.28	5354.22	0.00	932987.79	0.00007
0.00105	12.5891	27481.38	8.1702	1.5826	550.43	1.0551	0.001986	4170.51	33197.29	0.00075	1574.45	6266.33	0.00	1071895.02	0.00008
0.00106	12.5941	27636.36	8.1716	1.5728	547.00	1.0485	0.001998	4195.79	33398.47	0.00075	1585.20	6309.10	0.00	1078233.56	0.00008
0.00120	11.1849	27058.46	7.2236	1.2303	427.90	0.8202	0.002000	4200.00	33432.00	0.00081	1708.90	6801.44	0.00	1090389.63	0.00011
0.00150	9.2001	26082.30	5.8778	0.8096	281.58	0.5397	0.002000	4200.00	33432.00	0.00091	1917.41	7631.27	0.00	1105542.52	0.00016
0.00165	8.5258	25701.58	5.4144	0.6821	237.22	0.4547	0.002000	4200.00	33432.00	0.00095	2001.92	7967.64	0.00	1110402.66	0.00019
0.00180	7.9900	25369.84	5.0413	0.5859	203.78	0.3906	0.002000	4200.00	33432.00	0.00099	2076.87	8265.94	0.00	1114067.46	0.00023
0.00195	7.5592	25073.64	4.7362	0.5117	177.97	0.3411	0.002000	4200.00	33432.00	0.00102	2144.81	8536.33	0.00	1116815.85	0.00026
0.00210	7.2101	24801.40	4.4832	0.4532	157.62	0.3021	0.002000	4200.00	33432.00	0.00105	2208.10	8788.23	0.00	1118840.18	0.00029
0.00225	6.9257	24542.96	4.2709	0.4063	141.31	0.2709	0.002000	4200.00	33432.00	0.00108	2268.93	9030.35	0.00	1120274.54	0.00032
0.00240	6.6935	24289.38	4.0905	0.3681	128.04	0.2454	0.002000	4200.00	33432.00	0.00111	2329.31	9270.66	0.00	1121212.93	0.00036
0.00255	6.5042	24032.66	3.9355	0.3367	117.10	0.2245	0.002000	4200.00	33432.00	0.00114	2391.06	9516.44	0.00	1121721.22	0.00039
0.00270	6.3507	23765.62	3.8008	0.3105	107.98	0.2070	0.002000	4200.00	33432.00	0.00117	2455.87	9774.36	0.00	1121845.13	0.00043
0.00285	6.2277	23481.72	3.6822	0.2884	100.32	0.1923	0.002000	4200.00	33432.00	0.00120	2525.28	10050.60	0.00	1121615.51	0.00046
0.00300	6.1309	23174.93	3.5764	0.2698	93.82	0.1798	0.002000	4200.00	33432.00	0.00124	2600.73	10350.89	0.00	1121052.03	0.00049

Fuente: Elaboración propia (2018).

Gráfico 1. Diagrama Momento-Curvatura de la viga reforzada con acero en tensión y compresión.



Fuente: Elaboración propia (2018).

El Grafico N°01 nos permite entender que la viga reforzada con acero, experimenta el momento de agrietamiento, momento de servicio, momento de fluencia y momento último. Estos dos últimos momentos nos permitirá calcular la ductilidad de la viga reforzada con acero en tensión y compresión.

SEGUNDO ANÁLISIS: Viga doblemente reforzada con GFRP en tensión y compresión

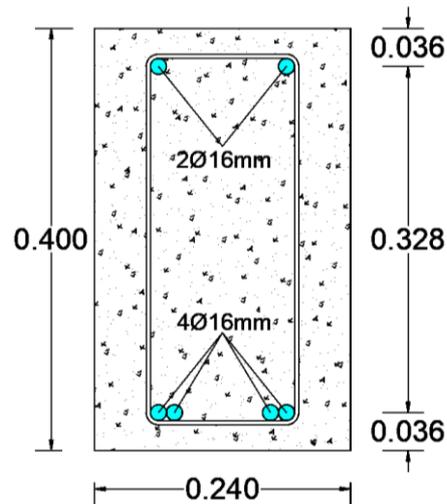


Tabla 13. Datos del concreto y del GFRP

Datos del Concreto	Nomenclatura	Valor	Unidad
Base Superior	B1	24	cm
Base Inferior	B2	24	cm
Altura de Viga	h	40	cm
Resistencia a la compresión del concreto	F'c	210	Kg/cm ²
Deformación de máx. Resistencia	ϵ'_c	0.002	
Datos del Refuerzo (GFRP)			
Esfuerzo de Fluencia del GFRP	Ffv	6502.75	Kg/cm ²
Módulo de elasticidad del GFRP	Efv	409315.61	Kg/cm ²
Área de GFRP en tensión	Afv	8.04	cm ²
Área de GFRP en compresión	A'fv	4.02	cm ²
Prof. Efectiva del GFRP en tensión	d	36.40	cm
Peralte de GFRP a compresión	d'	3.60	cm
Recubrimiento de la parte inferior	r	3.60	cm

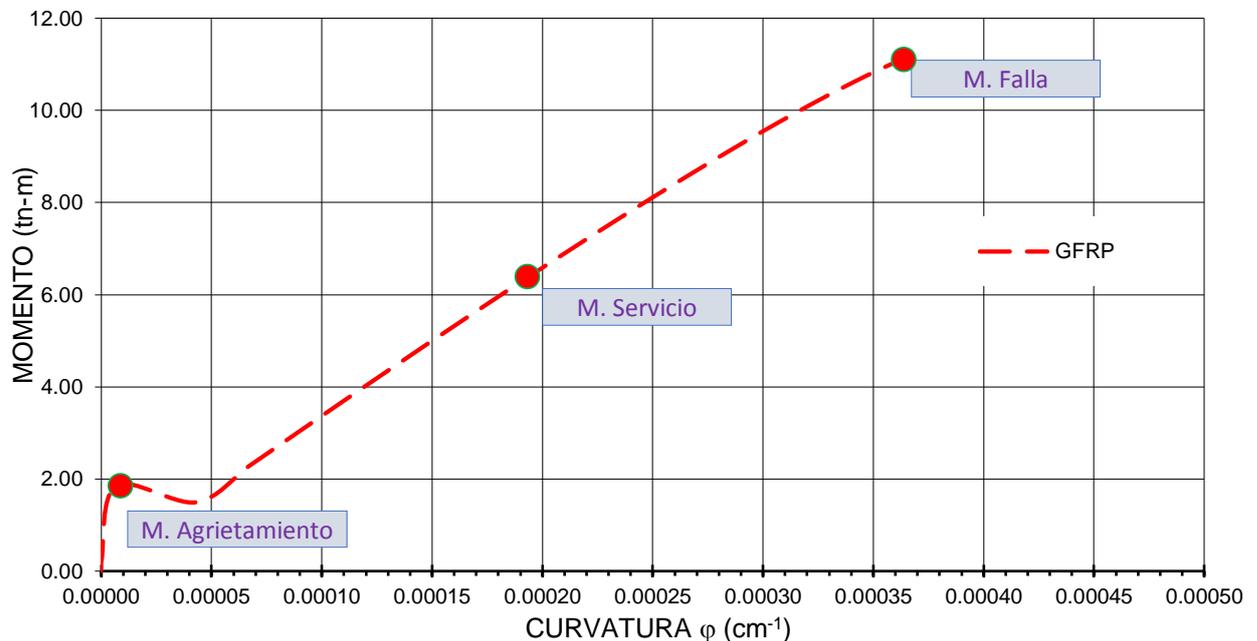
Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 14. Resultados del análisis en flexión de viga doblemente reforzada con varilla de GFRP en tensión y compresión.

e_{cmax}	c	Cc	X_c	h	T_c	X_t	e_{Nv}	f_{Nv}	F_{Nv}	e'_{Nv}	f'_{Nv}	F'_{Nv}	$C_c-T_c-(F_{Nv}F'_{Nv})=0$	M(kg-cm)	Curvatura
0.00000	0.0000	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.0000	0.000000	0.00	0.00	0.00000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00000
0.00001	37.2598	937.38	24.8347	2.7402	953.01	1.8268	0.000000	-0.09	-0.76	0.00001	3.70	14.86	0.00	25521.56	0.00000
0.000138	20.0592	6836.34	13.3333	19.1267	6652.12	12.7511	0.000113	46.16	371.13	0.00011	46.49	186.91	0.00	185113.80	0.00001
0.00030	6.9631	5000.88	4.6115	3.0638	1065.55	2.0425	0.001268	519.12	4173.75	0.00014	59.31	238.42	0.00	148902.24	0.00004
0.00045	6.6448	6970.05	4.3850	1.9491	677.90	1.2994	0.002015	824.81	6631.45	0.00021	84.40	339.29	0.00	229797.54	0.00007
0.00060	6.5968	8976.90	4.3368	1.4513	504.75	0.9675	0.002711	1109.53	8920.65	0.00027	111.57	448.50	0.00	306627.27	0.00009
0.00075	6.6193	10946.70	4.3341	1.1650	405.18	0.7767	0.003374	1381.15	11104.44	0.00034	140.03	562.91	0.00	380155.93	0.00011
0.00090	6.6704	12859.20	4.3488	0.9783	340.25	0.6522	0.004011	1641.87	13200.61	0.00041	169.57	681.66	0.00	450686.29	0.00013
0.00105	6.7366	14705.60	4.3720	0.8469	294.54	0.5646	0.004624	1892.47	15215.49	0.00049	200.11	804.43	0.00	518325.54	0.00016
0.00120	6.8125	16480.81	4.3997	0.7494	260.63	0.4996	0.005212	2133.25	17151.30	0.00057	231.62	931.11	0.00	583096.67	0.00018
0.00135	6.8958	18181.20	4.4304	0.6743	234.50	0.4495	0.005776	2364.23	19008.38	0.00065	264.10	1061.69	0.00	644980.74	0.00020
0.00150	6.9854	19803.74	4.4629	0.6147	213.80	0.4098	0.006316	2585.34	20786.13	0.00073	297.56	1196.18	0.00	703934.57	0.00021
0.00165	7.0809	21345.70	4.4968	0.5665	197.01	0.3776	0.006832	2796.44	22483.35	0.00081	332.01	1334.66	0.00	759898.79	0.00023
0.00180	7.1820	22804.41	4.5315	0.5267	183.18	0.3511	0.007323	2997.32	24098.44	0.00090	367.46	1477.20	0.00	812801.70	0.00025
0.00195	7.2890	24177.18	4.5669	0.4934	171.60	0.3289	0.007788	3187.75	25629.47	0.00099	403.95	1623.90	0.00	862560.90	0.00027
0.00210	7.4019	25461.22	4.6025	0.4653	161.82	0.3102	0.008227	3367.44	27074.26	0.00108	441.51	1774.86	0.00	909083.93	0.00028
0.00225	7.5213	26653.59	4.6381	0.4412	153.46	0.2942	0.008639	3536.11	28430.33	0.00117	480.15	1930.21	0.00	952268.12	0.00030
0.00240	7.6475	27751.19	4.6735	0.4206	146.29	0.2804	0.009023	3693.40	29694.98	0.00127	519.92	2090.08	0.00	991999.96	0.00031
0.00255	7.7811	28750.65	4.7081	0.4028	140.09	0.2685	0.009379	3838.95	30865.18	0.00137	560.85	2254.62	0.00	1028154.11	0.00033
0.00270	7.9227	29648.37	4.7416	0.3873	134.71	0.2582	0.009705	3972.34	31937.65	0.00147	602.98	2423.99	0.00	1060591.97	0.00034
0.00285	8.0732	30440.40	4.7734	0.3739	130.05	0.2493	0.010000	4093.13	32908.73	0.00158	646.36	2598.37	0.00	1089159.87	0.00035
0.00300	8.2334	31122.43	4.8028	0.3623	126.00	0.2415	0.010263	4200.80	33774.40	0.00169	691.04	2777.97	0.00	1113686.72	0.00036

Fuente: Elaboración propia (2018).

Gráfico 2. Diagrama Momento-Curvatura de la viga reforzada con GFRP en tensión y compresión



Fuente: Elaboración propia (2018).

El Grafico N°02 nos permite observar y entender que la viga reforzada con GFRP, experimenta el momento de agrietamiento, momento de servicio y momento último. Al no experimentar el momento de fluencia, dificulta hallar la ductilidad y poder compararlo con las vigas reforzadas con acero.

TERCER ANÁLISIS: Viga doblemente reforzada con acero en tensión y GFRP en compresión



Tabla 15. Datos del concreto, GFRP y acero

Datos del Concreto	Nomenclatura	Valor	Unidad
Base Superior	B1	24	cm
Base Inferior	B2	24	cm
Altura de Viga	h	40	cm
Resistencia a la compresión del concreto	F'C	210	Kg/cm ²
Deformación de máx. Resistencia	$\epsilon'c$	0.002	
Datos del Refuerzo a tensión (GFRP)			
Esfuerzo de Fluencia del GFRP	Ffv	6502.75	Kg/cm ²
Módulo de elasticidad del GFRP	Efv	409315.61	Kg/cm ²
Área de GFRP en tensión	Afv	8.04	cm ²
Prof. Efectiva del GFRP en tensión	d	36.40	cm
Recubrimiento de la parte inferior	r	3.60	cm
Datos del Refuerzo a compresión (ACERO)			
Esfuerzo de Fluencia del acero	Fy	4200	Kg/cm ²
Módulo de elasticidad del acero	Es	2100000	Kg/cm ²
Área de acero en compresión	A's	3.98	cm ²
Peralte de acero a compresión	d'	3.60	cm

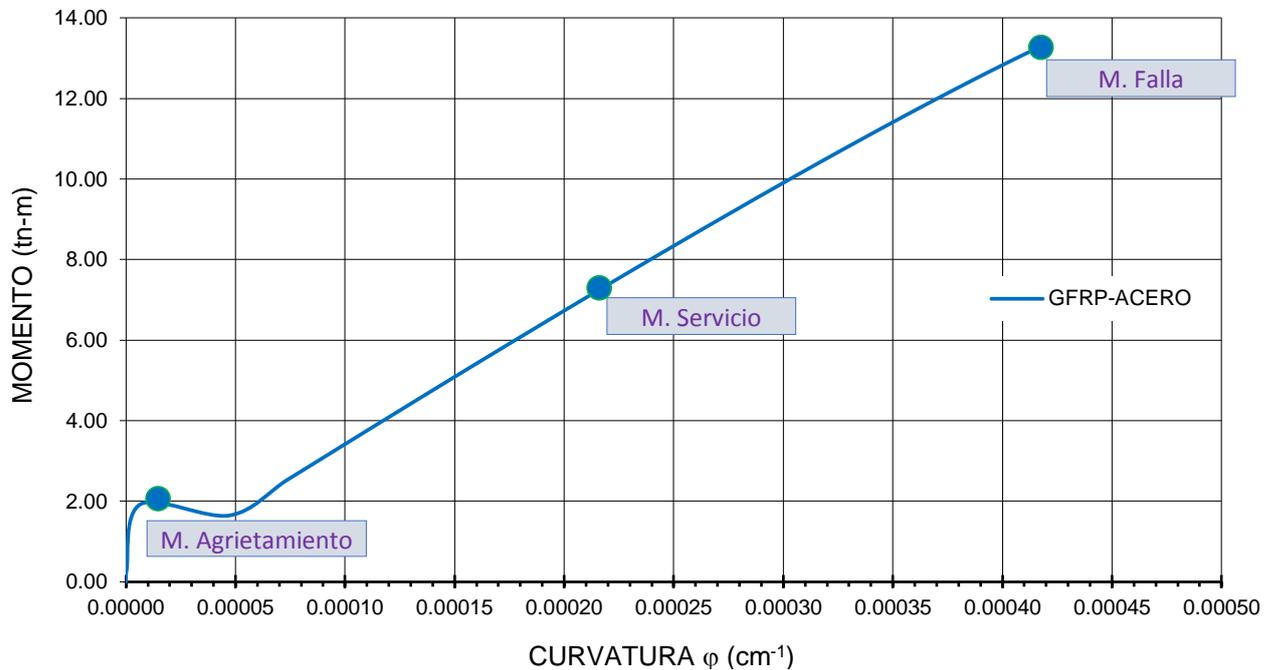
Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 16. Resultados del análisis en flexión de viga reforzada con varilla de GFRP en compresión y acero en tensión.

e_{cmax}	c	Cc	X_c	h	T_c	X_t	e_{iv}	f_{iv}	F_{iv}	e'_s	f'_s	F'_s	$C_c-T_c-(F_{iv}-F'_s)=0$	M(Kg-cm)	Curvatura
0.00000	0.0000	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.0000	0.00000000	0.00	0.00	0.00000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00000
0.00001	37.0977	933.30	24.7267	2.9023	1009.39	1.9349	-0.0000002	-0.08	-0.62	0.00001	18.96	75.47	0.00	27559.00	0.00000
0.000131	19.5542	6321.83	12.9997	19.6795	6844.39	13.1197	0.0001130	46.25	371.85	0.00011	224.73	894.41	0.00	192511.99	0.00001
0.00030	6.3484	4559.42	4.2044	2.7933	971.49	1.8622	0.0014201	581.28	4673.46	0.00013	272.74	1085.52	0.00	164407.25	0.00005
0.00045	6.1139	6413.16	4.0346	1.7934	623.73	1.1956	0.0022291	912.43	7335.90	0.00019	388.56	1546.47	0.00	252683.88	0.00007
0.00060	6.0780	8271.01	3.9958	1.3372	465.06	0.8914	0.0029933	1225.19	9850.51	0.00024	513.71	2044.56	0.00	337216.60	0.00010
0.00075	6.0949	10079.42	3.9907	1.0727	373.08	0.7151	0.0037292	1526.41	12272.30	0.00031	644.71	2565.95	0.00	418805.83	0.00012
0.00090	6.1329	11823.10	3.9984	0.8995	312.84	0.5997	0.0044416	1818.03	14616.98	0.00037	780.58	3106.72	0.00	497743.58	0.00015
0.00105	6.1821	13495.11	4.0121	0.7772	270.30	0.5181	0.0051324	2100.78	16890.24	0.00044	920.96	3665.42	0.00	574136.39	0.00017
0.00120	6.2381	15091.26	4.0288	0.6862	238.65	0.4575	0.0058021	2374.89	19094.15	0.00051	1065.72	4241.55	0.00	648013.85	0.00019
0.00135	6.2993	16608.40	4.0471	0.6159	214.22	0.4106	0.0064509	2640.44	21229.17	0.00058	1214.82	4834.98	0.00	719368.16	0.00021
0.00150	6.3647	18043.88	4.0663	0.5601	194.80	0.3734	0.0070786	2897.38	23294.90	0.00065	1368.29	5445.81	0.00	788170.60	0.00024
0.00165	6.4339	19395.22	4.0859	0.5147	179.01	0.3431	0.0076850	3145.58	25290.47	0.00073	1526.20	6074.27	0.00	854379.05	0.00026
0.00180	6.5067	20659.96	4.1054	0.4772	165.95	0.3181	0.0082697	3384.91	27214.66	0.00080	1688.61	6720.65	0.00	917941.67	0.00028
0.00195	6.5830	21835.64	4.1246	0.4456	154.98	0.2971	0.0088322	3615.17	29065.99	0.00088	1855.61	7385.34	0.00	978798.68	0.00030
0.00210	6.6631	22919.71	4.1431	0.4188	145.66	0.2792	0.0093722	3836.17	30842.79	0.00097	2027.32	8068.74	0.00	1036883.16	0.00032
0.00225	6.7469	23909.47	4.1606	0.3958	137.66	0.2639	0.0098888	4047.66	32543.15	0.00105	2203.86	8771.35	0.00	1092121.31	0.00033
0.00240	6.8348	24802.08	4.1768	0.3759	130.74	0.2506	0.0103817	4249.38	34165.01	0.00114	2385.35	9493.67	0.00	1144432.30	0.00035
0.00255	6.9269	25594.51	4.1913	0.3586	124.71	0.2390	0.0108500	4441.06	35706.09	0.00122	2571.93	10236.29	0.00	1193727.88	0.00037
0.00270	7.0235	26283.50	4.2035	0.3434	119.42	0.2289	0.0112929	4622.38	37163.90	0.00132	2763.77	10999.82	0.00	1239911.74	0.00038
0.00285	7.1251	26865.55	4.2129	0.3300	114.77	0.2200	0.0117098	4793.00	38535.73	0.00141	2961.04	11784.95	0.00	1282878.68	0.00040
0.00300	7.2320	27336.85	4.2186	0.3182	110.67	0.2121	0.0120996	4952.56	39818.60	0.00151	3163.93	12592.42	0.00	1322513.56	0.00041

Fuente: Elaboración propia (2018).

Gráfico 3. Diagrama Momento-Curvatura de la viga reforzada con GFRP en compresión y acero en tensión.

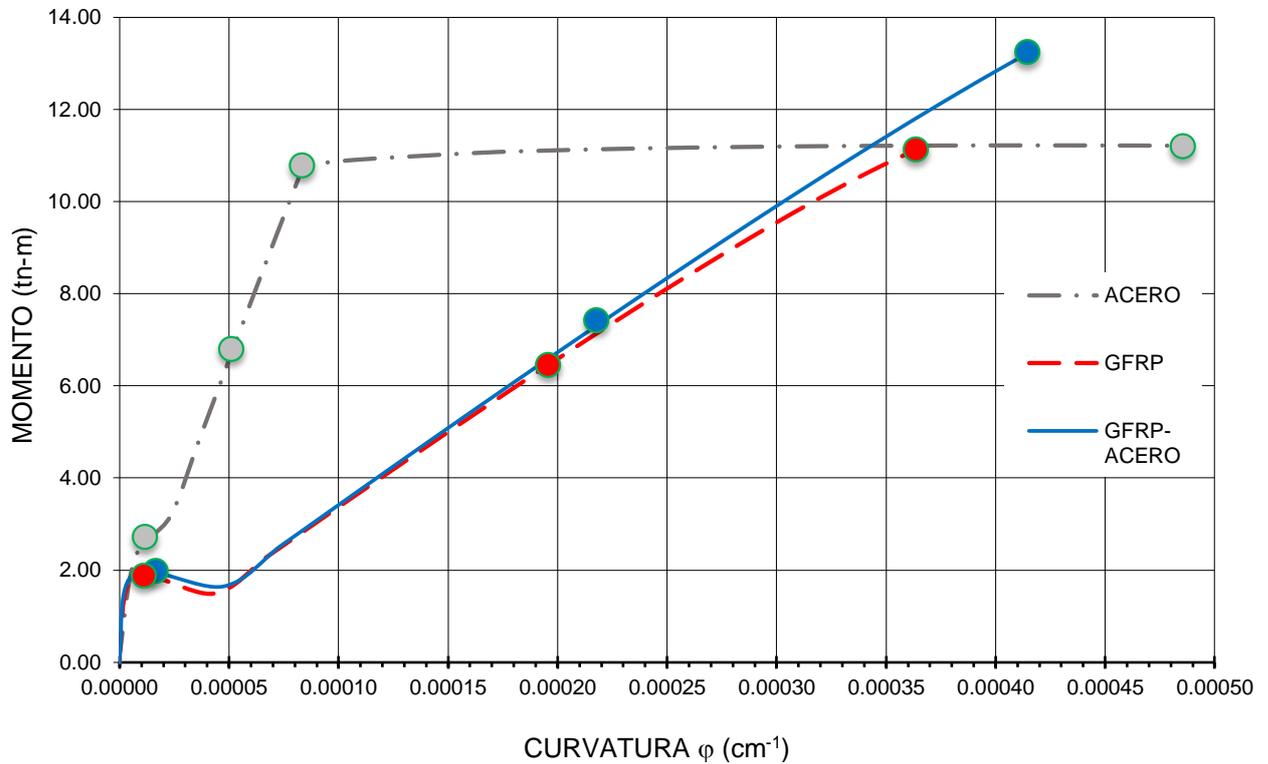


Fuente: Elaboración propia (2018).

El Gráfico N°03 nos permite observar y entender que al incorporar el acero como refuerzo en compresión y GFRP en tensión al concreto armado. Al igual que el segundo análisis solo experimenta momento de agrietamiento, momento de servicio y momento último.

Finalmente, unificaremos los gráficos de momento-curvatura de los tres análisis, para poder comparar y analizar de acuerdo a los resultados.

Gráfico 4. Diagrama Comparativo de Momento-Curvatura.



Fuente: Elaboración propia (2018).

Al observar el gráfico 04, se puede notar que únicamente la viga reforzada con acero llegan a su punto de fluencia, con momento creciente; a partir del punto de fluencia mantiene un momento casi constante hasta la falla del elemento. Asimismo, se puede afirmar que las vigas reforzadas con GFRP (tracción y compresión), no alcanzan su punto de fluencia, la falla del elemento es básicamente por falla de compresión del concreto. Otro aspecto importante a resaltar es que las vigas reforzadas con GFRP-Acero (tracción y compresión respectivamente), tampoco llegan a su punto de fluencia, teniendo sí mejor comportamiento estructural que la viga reforzadas únicamente con GFRP.

4.1.1 Ductilidad de las vigas reforzados con acero, GFRP y GFRP-acero

La ductilidad de un material se define como la cantidad de deformación plástica máxima que es capaz soportar un material antes de romper (Otazzi, 2017). Cuya ecuacion esta representado de la siguiente manera:

$$\mu_{\varphi} = \frac{\varphi_{m\acute{a}x}}{\varphi_y}$$

De la grafica 01 , 02 y 03, se puede extraer los puntos importantes del diagrama momento-curvatura como son: punto de agrietamiento, punto de fluencia del refuerzo y punto de falla del elemento.

Tabla 17. Puntos de quiebre del momento-curvatura para la viga con diferentes refuerzos.

PUNTOS DE QUIEBRE	VIGA CON ACERO		VIGA CON GFRP		VIGA CON GFRP-ACERO	
	Momento (kg.cm)	Curvatura (cm ⁻¹)	Momento (kg.cm)	Curvatura (cm ⁻¹)	Momento (kg.cm)	Curvatura (cm ⁻¹)
Antes de fisuración	227621.25	0.00001	185113.80	0.00001	192511.99	0.00001
Después de fisuración	317704.63	0.00002	148902.24	0.00004	164407.25	0.00005
Inicio de fluencia	1078233.56	0.00008	No llega	No llega	No llega	No llega
Falla del elemento	1121052.03	0.00049	1113686.72	0.00036	1322513.56	0.00041

Fuente: Elaboración propia (2018).

Al visualizar y analizar el gráfico de momento-curvatura, se puede concluir que sólo la viga reforzada con acero (traccion y compresion) puede experimentar los tres puntos ya antes mencionadas, por lo tanto, en este análisis es el único elemento que presenta ductilidad. Esto se debe a que el acero en traccion alcanza su punto de fluencia.

Tabla 18. Tabla de ductilidad de las vigas reforzadas.

	VIGA CON ACERO	VIGA CON GFRP	VIGA CON GFRP-ACERO
DUCTILIDAD	5.83	No Llega	No llega

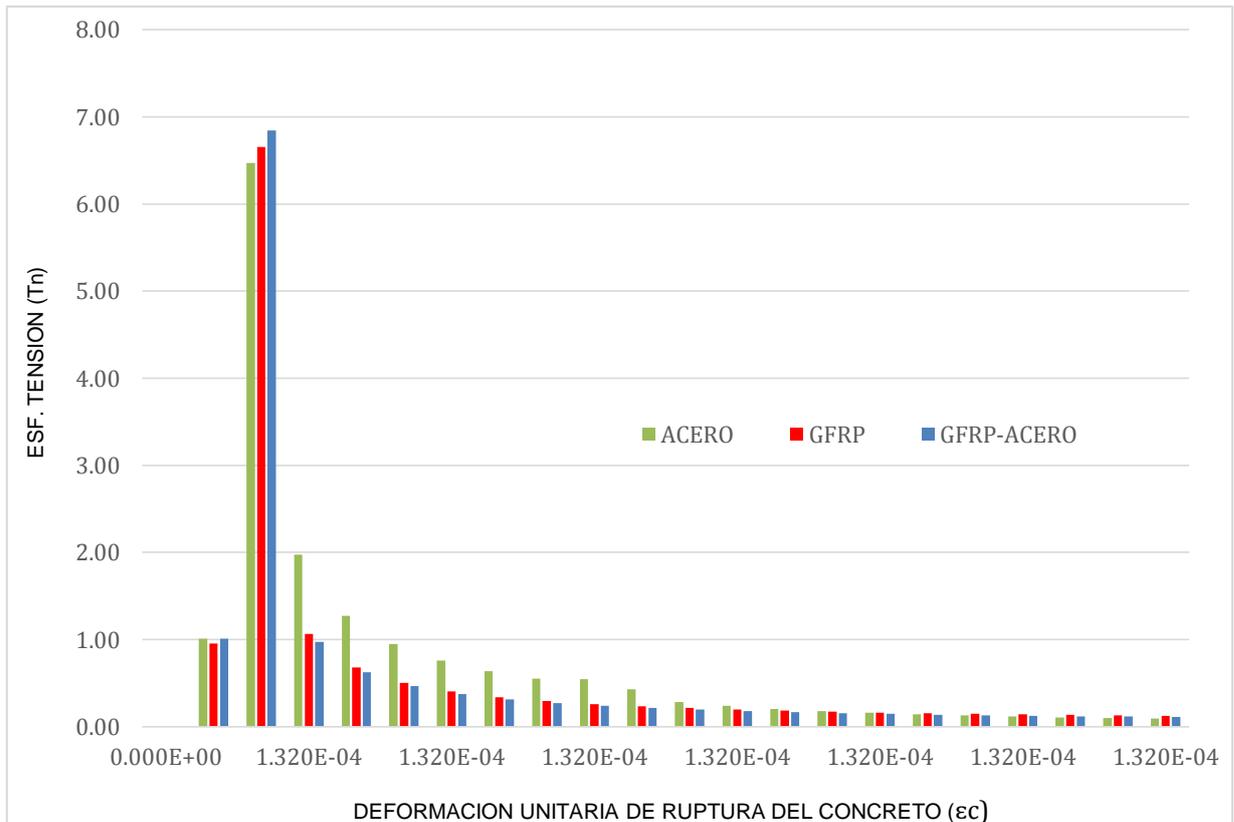
Fuente: Elaboración propia (2018).

4.1.2 Esfuerzo de compresión y tensión del concreto.

Para este análisis se consideró el mismo factor de resistencia a la compresión del concreto ($f'c=210\text{kg/cm}^2$), de los resultados obtenidos en la tabla 12,14 y 16 se pudo graficar el comportamiento de esfuerzos tanto de tensión y compresión.

- *Esfuerzo de compresión del concreto*

Gráfico 5. Diagrama esfuerzo-deformación en tensión del concreto en vigas reforzadas con acero, GFRP y GFRP-acero.



Fuente: Elaboración propia (2018).

En el grafica N°05 se puede observar que la viga reforzado con acero, llega a su punto de agrietamiento con menor esfuerzo de tensión del concreto (6.47 tn), la viga reforzada con GFRP alcanza a su punto de fisuración con un esfuerzo a tensión del concreto (6.65 tn) y por último la viga reforzado con acero y GFRP (compresión y tensión respectivamente), alcanzaría su punto de fisuración con un esfuerzo a tensión del concreto mayor a los dos anteriores (6.84 tn).

De acuerdo al resultado del análisis de los momentos internos de cada viga reforzada (tabla 17), en el punto de agrietamiento da cada análisis. Podemos concluir que la viga reforzada con acero soporta más carga antes de llegar a su fisuración a pesar de soportar menor esfuerzo de tensión del concreto.

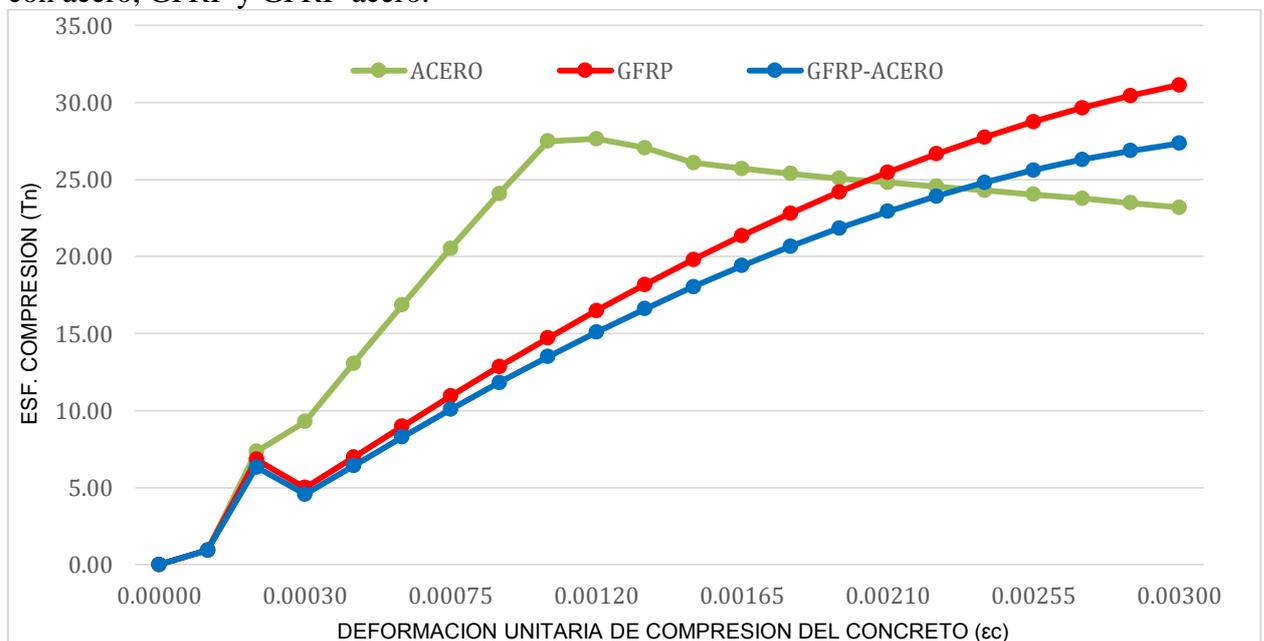
Así mismo la viga reforzada solo con GFRP, presenta un esfuerzo de tensión medio entre las otras dos vigas, sin embargo, de acuerdo al momento interno que soporta concluimos que la viga soportaría una carga menor a los otros dos, para llegar a su punto de fisuración.

Por último, la viga reforzada con acero y GFRP (compresión y tensión respectivamente) a pesar de tener el mayor esfuerzo a tensión del concreto en su punto de fisuración, no es quien soporta mayor momento interno, si no el segundo.

A partir de su fisuración la viga reforzada con acero, en mayor parte soporta mayor esfuerzo a tensión del concreto, seguido de la viga reforzada con GFRP y culminando con la viga reforzada con acero y GFRP.

- *Esfuerzo de tensión del concreto*

Gráfico 6. Diagrama esfuerzo-deformación a compresión del concreto en vigas reforzadas con acero, GFRP y GFRP-acero.



Fuente: Elaboración propia (2018).

En el grafica N°06 se puede observar que la viga reforzado con acero, presenta mayor esfuerzo a compresión del concreto que los otros dos, este esfuerzo a compresión del concreto es de manera creciente hasta llegar a su punto de fluencia del acero, y a partir de ese entonces empieza a decrecer hasta llegar a la falla del elemento.

Las vigas reforzadas con GFRP y acero-GFRP, mantienen un esfuerzo de compresión de manera creciente a partir de la fisuración del elemento.

De la curva esfuerzo-deformación a compresión del concreto, podemos concluir que quien soporta mayor esfuerzo a compresión respecto a su deformación unitaria del concreto, por lo general será quien soporta mayor carga aplicada hasta llegar al punto de falla.

Tabla 19. Tabla de esfuerzo del concreto de las vigas reforzadas.

ESFUERZO DEL CONCRETO	VIGA CON ACERO (BASE)		VIGA CON GFRP				VIGA CON GFRP-ACERO			
	TENSION (Tn)	COMPRESION (Tn)	TENSION (Tn)	COMPRESION (Tn)	% Var. Tensión	% Var. Compres.	TENSION (Tn)	COMPRESION (Tn)	% Var. tensión	% Var. Compres.
Antes de fisuración	6.474	7.351	6.652	6.836	3%	-7%	6.844	6.321	6%	-14%
Después de fisuración	1.977	9.28	1.066	5	-46%	-46%	0.971	4.559	-51%	-51%
Momento de Servicio	0.76	20.53	0.197	21.345	-74%	4%	0.179	19.395	-76%	-6%
Inicio de fluencia	0.547	27.636	-	-	-	-	-	-	-	-
Falla del elemento	0.093	23.175	0.126	31.122	35%	34%	0.111	27.336	19%	18%

Fuente: Elaboración propia (2018).

El esfuerzo a tensión del concreto reforzado con GFRP en comparación con el acero, se incrementa en dos momentos, antes de la fisuración e instantes antes de la falla del elemento.

El esfuerzo a compresión del concreto reforzado con GFRP disminuyen de manera progresiva hasta llegar a la fisuración del elemento, para luego empezar a incrementarse hasta la falla del elemento.

Máxima carga aplicada

Una vez conocida el momento máximo interno, calcularemos la máxima carga de acuerdo al diseño planteado. El diseño planteado es muy similar al diseño planteado por Almerich, (2010), en su tesis doctoral “Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP”. Se planteo el diseño similar, para luego ser comparado con lo experimental, ya desarrollado.

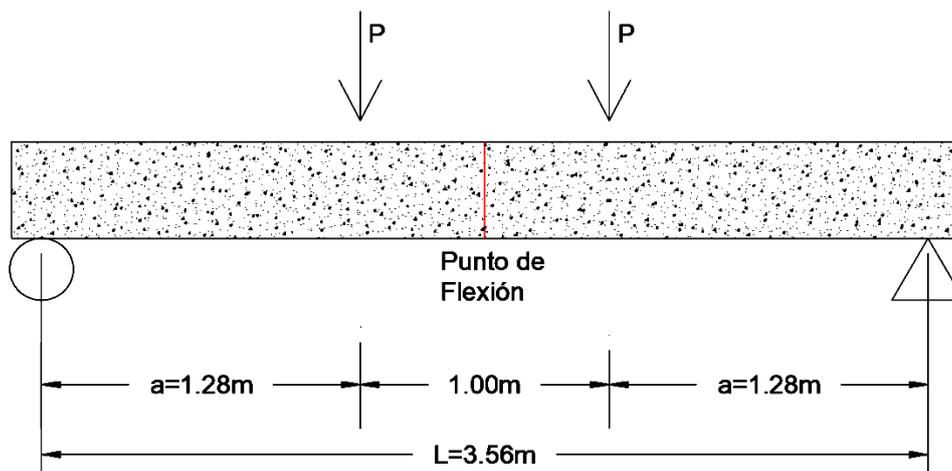


Figura 19. Viga simplemente apoyada.

Fuente: Elaboración propia (2018).

Nuestro análisis está centrado en lo que es Flexión, por consiguiente, todo el análisis se da en el centro de luz de la viga. De acuerdo al diseño planteado corresponde utilizar la siguiente expresión,

$$M_a = \frac{3}{2}Pa \left(1 - \frac{a}{L}\right) + \frac{1}{8}qL^2$$

Del cual despejamos P:

$$P = \frac{2L}{3a(L - a)} \left(M_a - \frac{1}{8}qL^2\right)$$

Siendo:

P: Carga Máxima

L: Distancia Total entre los apoyos

a: Distancia de un apoyo a la carga aplicada “P”

q: Peso propio del concreto por metro lineal

$$q = \frac{bh}{2}(\gamma_c) \rightarrow \gamma_c: \text{Peso específico del concreto}$$

4.1.3 Análisis de deflexión.

Se realizará el análisis de deflexión instantánea de la viga, de acuerdo a las ecuaciones de Branson. Esta ecuación permite el cálculo de una deflexión muy cercana a la deflexión experimental, por lo cual ha sido incorporado en las normas de ACI.

PRIMER ANÁLISIS: Viga doblemente reforzada con acero en tensión y compresión

Datos del Concreto	Nomenclatura	Valor	Unidad
Base Superior	B ₁	24	cm
Base Inferior	B ₂	24	cm
Altura de Viga	h	40	cm
Resistencia a la compresión del concreto	F' _c	210	Kg/cm ²
Deformación de máx. Resistencia	ε' _c	0.002	
Datos del Refuerzo (ACERO)			
Esfuerzo de Fluencia del acero	F _y	4200	Kg/cm ²
Módulo de elasticidad del acero	E _s	2100000	Kg/cm ²
Área de acero en tensión	A _s	7.96	cm ²
Área de acero en compresión	A' _s	3.98	cm ²
Prof. Efectiva del acero en tensión	d	36.40	cm
Peralte de acero a compresión	d'	3.60	cm
Recubrimiento de la parte inferior	r	3.60	cm

Relación modular n:

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{E_s}{15100\sqrt{f'_c}} = \frac{2100000}{15100\sqrt{210}} = 9.60$$

Distancia del centroide a la fibra extrema de tensión, para vigas rectangulares y_t:

$$y_t = \frac{h}{2} = 20\text{cm}$$

Momento de inercia de la sección bruta de viga rectangular, I_g:

$$I_g = \frac{bxh^3}{12} = 128000\text{cm}^4$$

Módulo de ruptura del concreto, fr:

$$f_r = 2\sqrt{f'_c} = 28.983 \text{ kg/cm}^2$$

Momento de agrietamiento, M_{cr}:

$$M_{cr} = \frac{f_r x I_g}{y_t} = 185491.20 \text{ kg} - \text{cm}$$

Momento de inercia de agrietamiento, I_{cr}:

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + nA_s(d - kd)^2 + (n - 1)A'_s(kd - d')^2$$

Donde:

$$B = \frac{b}{nA_s} = 0.31417 \text{ cm}^{-1}$$

$$r = \frac{(n - 1)A'_s}{nA_s} = 0.4479$$

$$kd = \frac{\left[\sqrt{2dB + \left(1 + \frac{rd'}{d}\right) + (1 + r)^2} - (1 + r) \right]}{B} = 11.6253$$

$$I_{cr} = 61660.8 \text{ cm}^4$$

Momento de inercia efectivo entre puntos de inflexión, I_e:

$$\text{Ecuación de Branson: } I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g$$

Deflexión de viga reforzado con acero.

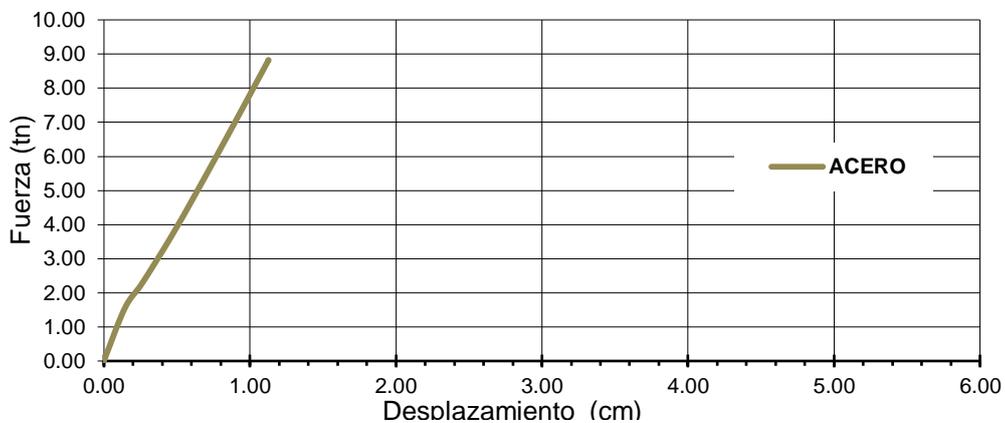
$$\Delta = \frac{5}{384} q \frac{L^4}{EI_e} + \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{24EI_e}$$

Tabla 20. Resultados del análisis en deflexión de viga reforzada con varilla de GFRP-Acero.

ACERO			
Ig=	128000	Cm4	
Mcr=	185489.62	Kg-cm	
Icr=	61660.8295	Cm4	
Ma (kg-cm)	P (Kgf)	Ie (cm4)	Δ (cm)
0.00	0.00	0.00	0.00
227492.44	1553.21	97621.51	0.14
317704.63	2286.84	74863.39	0.26
480518.19	3610.89	65476.75	0.46
637429.96	4886.95	63295.50	0.63
788190.27	6112.98	62525.47	0.79
932987.79	7290.52	62182.15	0.93
1071895.02	8420.15	62004.60	1.08
1078233.56	8471.70	61998.58	1.08
1090389.63	8570.56	61987.41	1.10
1105542.52	8693.79	61974.16	1.11
1110402.66	8733.31	61970.06	1.12
1114067.46	8763.11	61967.02	1.12
1116815.85	8785.46	61964.77	1.12
1118840.18	8801.93	61963.12	1.13
1120274.54	8813.59	61961.96	1.13
1121212.93	8821.22	61961.21	1.13
1121721.22	8825.36	61960.80	1.13
1121845.13	8826.36	61960.70	1.13
1121615.51	8824.50	61960.88	1.13
1121052.03	8819.91	61961.33	1.13

Fuente: Elaboración propia (2018).

Gráfico 7. Fuerza-Deflexión de viga doblemente reforzado con acero.



Fuente: Elaboración propia (2018).

Como se puede observar en la tabla 20, la viga reforzada con acero alcanza la deflexión máxima poco después del punto de fluencia. Para luego permanecer constante hasta la falla del elemento

SEGUNDO ANÁLISIS: Viga doblemente reforzada con GFRP en tensión y compresión.

Datos del Concreto	Nomenclatura	Valor	Unidad
Base Superior	B ₁	24	cm
Base Inferior	B ₂	24	cm
Altura de Viga	h	40	cm
Resistencia a la compresión del concreto	F' _c	210	Kg/cm ²
Deformación de máx. Resistencia	ε' _c	0.002	
Datos del Refuerzo (GFRP)			
Esfuerzo de Fluencia del GFRP	F _{fv}	6502.75	Kg/cm ²
Módulo de elasticidad del GFRP	E _{fv}	409315.61	Kg/cm ²
Área de GFRP en tensión	A _{fv}	8.04	cm ²
Área de GFRP en compresión	A' _{fv}	4.02	cm ²
Prof. Efectiva del GFRP en tensión	d	36.40	cm
Peralte de GFRP a compresión	d'	3.60	cm
Recubrimiento de la parte inferior	r	3.60	cm

Relación modular n:

$$n = \frac{E_{fv}}{E_c} = \frac{E_{fv}}{15100\sqrt{f'_c}} = \frac{409315.61}{15100\sqrt{210}} = 1.87$$

Distancia del centroide a la fibra extrema de tensión, para vigas rectangulares y_t:

$$y_t = \frac{h}{2} = 20\text{cm}$$

Momento de inercia de la sección bruta de viga rectangular, I_g:

$$I_g = \frac{bxh^3}{12} = 128000\text{cm}^4$$

Módulo de ruptura del concreto, f_r:

$$f_r = 2\sqrt{f'_c} = 28.983\text{ kg/cm}^2$$

Momento de agrietamiento, M_{cr}:

$$M_{cr} = \frac{f_r x I_g}{y_t} = 185491.20\text{kg} - \text{cm}$$

Momento de inercia de agrietamiento, I_{cr}:

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + nA_{fv}(d - kd)^2 + (n - 1)A'_{fv}(kd - d')^2$$

Donde:

$$B = \frac{b}{nA_{fv}} = 1.59582\text{ cm}^{-1}$$

$$r = \frac{(n-1)A'_{fv}}{nA_{fv}} = 0.2327$$

$$kd = \frac{\left[\sqrt{2dB + \left(1 + \frac{rd'}{d}\right) + (1+r)^2} - (1+r) \right]}{B} = 6.05525$$

$$I_{cr} = 15645.5 \text{ cm}^4$$

Momento de inercia efectivo entre puntos de inflexión, I_e :

Ecuación de Branson: $I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g$

– *Deflexión de viga reforzado con GFRP.*

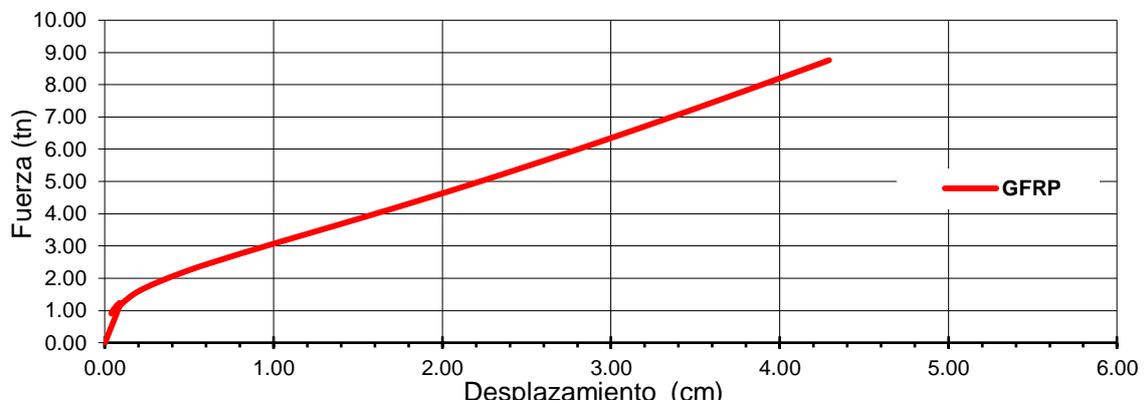
$$\Delta = \frac{5}{384} W \frac{L^4}{EI_e} + \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{24EI_e}$$

Tabla 21. Resultados del análisis en deflexión de viga reforzada con varilla de GFRP.

GFRP			
Ig=	128000	Cm4	
Mcr=	185489.62	Kg-cm	
Icr=	15645.5234	Cm4	
M _{Ad} (kg-cm)	P (Kgf)	Ie	Δ (cm)
0.00	0.00	0.00	0.00
185113.80	1208.57	128685.70	0.09
148902.24	914.09	232838.38	0.04
229797.54	1571.96	74735.40	0.19
306627.27	2196.76	40517.88	0.47
380155.93	2794.72	28697.13	0.82
450686.29	3368.29	23478.49	1.19
518325.54	3918.35	20794.74	1.55
583096.67	4445.09	19262.35	1.88
644980.74	4948.35	18317.97	2.19
703934.57	5427.79	17701.19	2.48
759898.79	5882.90	17279.64	2.74
812801.70	6313.13	16980.87	2.98
862560.90	6717.78	16762.85	3.20
909083.93	7096.12	16599.94	3.41
952268.12	7447.31	16475.89	3.60
991999.96	7770.42	16380.06	3.77
1028154.11	8064.44	16305.27	3.93
1060591.97	8328.23	16246.56	4.07
1089159.87	8560.56	16200.50	4.19
1113686.72	8760.02	16164.63	4.29

Fuente: Elaboración propia (2018).

Gráfico 8. Fuerza-Deflexión de viga doblemente reforzado con GFRP.



Fuente: Elaboración propia (2018).

Como se puede observar en la tabla 21, la viga reforzada con GFRP tiene una deflexión progresiva hasta llegar a la falla del elemento.

TERCER ANÁLISIS: Viga doblemente reforzada con acero en tensión y GFRP en compresión.

Datos del Concreto	Nomenclatura	Valor	Unidad
Base Superior	B ₁	24	cm
Base Inferior	B ₂	24	cm
Altura de Viga	h	40	cm
Resistencia a la compresión del concreto	F _c '	210	Kg/cm ²
Deformación de máx. Resistencia	ε _c '	0.002	
Datos del Refuerzo a tensión (GFRP)			
Esfuerzo de Fluencia del GFRP	F _{fv}	6502.75	Kg/cm ²
Módulo de elasticidad del GFRP	E _{fv}	409315.61	Kg/cm ²
Área de GFRP en tensión	A _{fv}	8.04	cm ²
Prof. Efectiva del GFRP en tensión	d	36.40	cm
Recubrimiento de la parte inferior	r	3.60	cm
Datos del Refuerzo a compresión (ACERO)			
Esfuerzo de Fluencia del acero	F _y	4200	Kg/cm ²
Módulo de elasticidad del acero	E _s	2100000	Kg/cm ²
Área de acero en compresión	A _s '	3.98	cm ²
Peralte de acero a compresión	d'	3.60	cm

Relación modular n:

$$n_{fv} = \frac{E_{fv}}{E_c} = \frac{E_{fv}}{15100\sqrt{f'_c}} = \frac{409315.61}{15100\sqrt{210}} = 1.87$$

$$n_s = \frac{E_s}{E_c} = \frac{E_s}{15100\sqrt{f'_c}} = \frac{2100000}{15100\sqrt{210}} = 9.60$$

Distancia del centroide a la fibra extrema de tensión, para vigas rectangulares y_t:

$$y_t = \frac{h}{2} = 20\text{cm}$$

Momento de inercia de la sección bruta de viga rectangular, I_g:

$$I_g = \frac{bxh^3}{12} = 128000\text{cm}^4$$

Módulo de ruptura del concreto, fr:

$$f_r = 2\sqrt{f'_c} = 28.983\text{ kg/cm}^2$$

Momento de agrietamiento, M_{cr}:

$$M_{cr} = \frac{f_r x I_g}{y_t} = 185491.20 \text{ kg} - \text{cm}$$

Momento de inercia de agrietamiento, I_{cr} :

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + n_{fv} A_{fv} (d - kd)^2 + (n_s - 1) A'_s (kd - d')^2$$

Donde:

$$B = \frac{b}{n_{fv} A_{fv}} = 1.59582 \text{ cm}^{-1}$$

$$r = \frac{(n_s - 1) A'_s}{n_{fv} A_{fv}} = 0.2327$$

$$kd = \frac{\left[\sqrt{2dB + \left(1 + \frac{rd'}{d}\right) + (1+r)^2} - (1+r) \right]}{B} = 6.05525$$

$$I_{cr} = 15821.51 \text{ cm}^4$$

Momento de inercia efectivo entre puntos de inflexión, I_e :

Ecuación de Branson: $I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g$

– *Deflexión de viga reforzado con GFRP-Acero.*

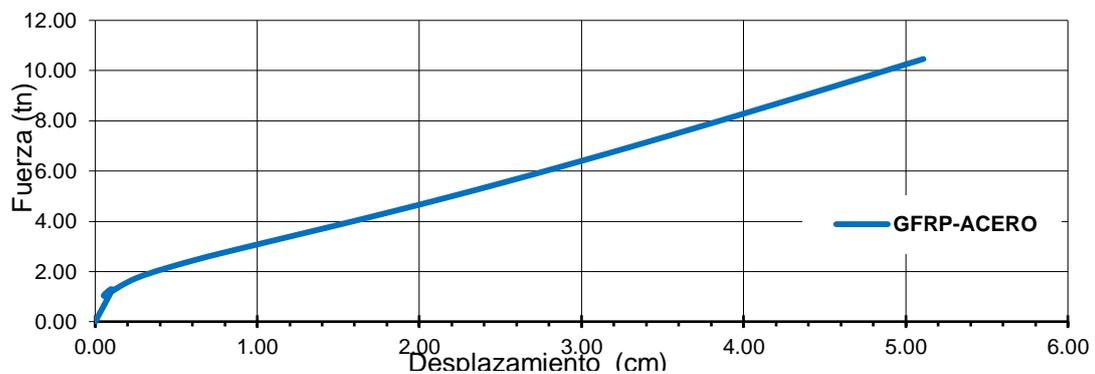
$$\Delta = \frac{5}{384} W \frac{L^4}{EI_e} + \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{24EI_e}$$

Tabla 22. Resultados del análisis en deflexión de viga reforzada con varilla de GFRP-
acero

GFRP-ACERO			
Ig=	128000	Cm ⁴	
Mcr=	185489.62	Kg-cm	
Icr=	15821.51302	Cm ⁴	
M_{Ad} (kg-cm)	P (Kgf)	Ie	Δ (cm)
0.00	0.00	0.00	0.00
192511.99	1268.74	116166.36	0.10
164407.25	1040.18	176925.22	0.06
252683.88	1758.07	60196.25	0.26
337216.60	2445.52	34491.40	0.61
418805.83	3109.03	25567.60	1.02
497743.58	3750.98	21627.17	1.43
574136.39	4372.23	19604.40	1.82
648013.85	4973.02	18452.48	2.19
719368.16	5553.30	17744.67	2.52
788170.60	6112.82	17283.72	2.84
854379.05	6651.25	16969.45	3.14
917941.67	7168.16	16747.11	3.41
978798.68	7663.07	16584.98	3.68
1036883.16	8135.43	16463.73	3.92
1092121.31	8584.64	16371.12	4.16
1144432.30	9010.05	16299.15	4.37
1193727.88	9410.94	16242.39	4.58
1239911.74	9786.52	16197.09	4.77
1282878.68	10135.94	16160.60	4.95
1322513.56	10458.26	16131.02	5.11

Fuente: Elaboración propia (2018).

Gráfico 9. Fuerza-Deflexión de viga doblemente reforzado con GFRP y acero.



Fuente: Elaboración propia (2018).

Como se puede observar en la tabla 22, la deflexión no disminuye cuando reemplazamos varillas de GFRP en compresión por las de acero.

– Cuadro comparativo de deflexiones.

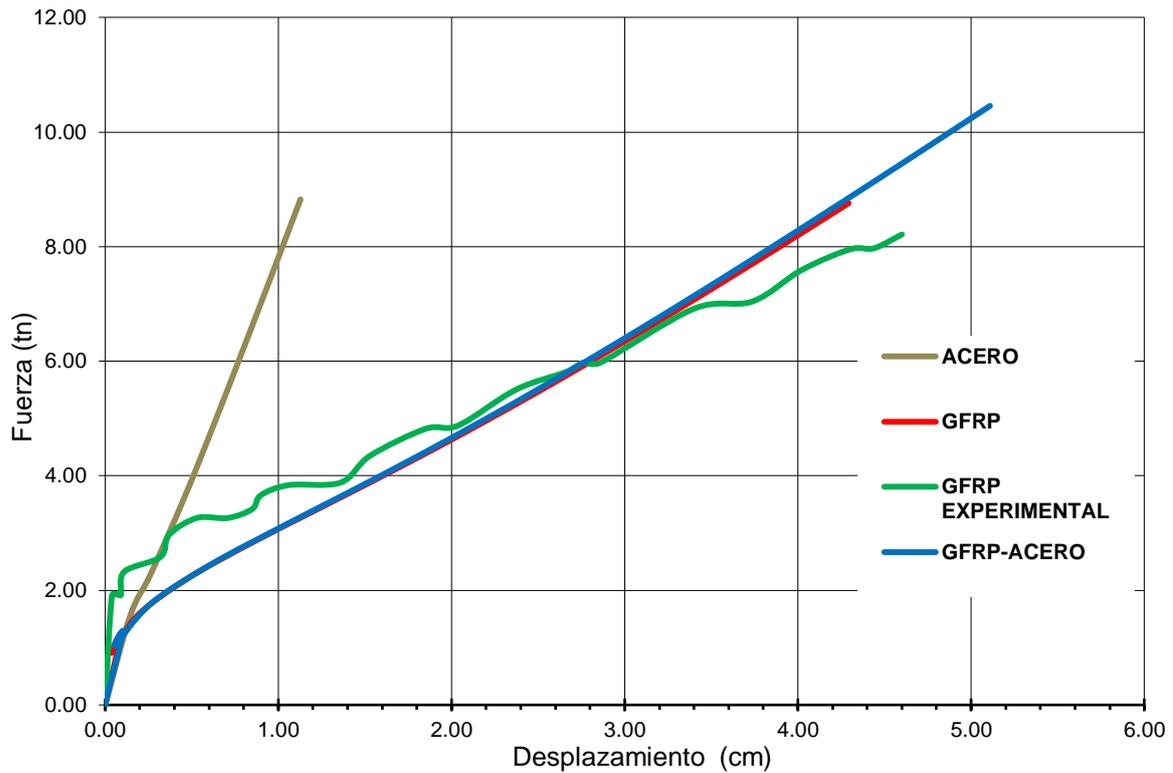
La tabla N°23, es un resumen de lo ya antes calculado, se elabora este resumen para poder comparar los gráficos de fuerza aplicada en cada uno de las vigas versus sus deflexiones respectivas (también conocido como flecha) que se genera hasta llegar a la falla del elemento.

Así mismo incorporan los resultados experimentales de la viga reforzada con GFRP obtenidos por Almerich (2010), en su tesis doctoral “Diseño, según Estados Límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP”

Tabla 23. Resultados del análisis en flexión de viga doblemente reforzada.

ACERO		GFRP		GFRP experimental		GFRP-ACERO	
P (Kgf)	Δ (cm)	P (Kgf)	Δ (cm)	P (Kgf)	Δ (cm)	P (Kgf)	Δ (cm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1553.21	0.14	1208.57	0.09	1911.98	0.04	1268.74	0.10
2286.84	0.26	914.09	0.04	1911.98	0.09	1040.18	0.06
3610.89	0.46	1571.96	0.19	2324.96	0.11	1758.07	0.26
4886.95	0.63	2196.76	0.47	2583.97	0.32	2445.52	0.61
6112.98	0.79	2794.72	0.82	2971.46	0.37	3109.03	1.02
7290.52	0.93	3368.29	1.19	3264.12	0.53	3750.98	1.43
8420.15	1.08	3918.35	1.55	3264.12	0.71	4372.23	1.82
8471.70	1.08	4445.09	1.88	3421.16	0.85	4973.02	2.19
8570.56	1.10	4948.35	2.19	3662.83	0.90	5553.30	2.52
8693.79	1.11	5427.79	2.48	3837.21	1.06	6112.82	2.84
8733.31	1.12	5882.90	2.74	3882.07	1.36	6651.25	3.14
8763.11	1.12	6313.13	2.98	4350.13	1.53	7168.16	3.41
8785.46	1.12	6717.78	3.20	4820.22	1.85	7663.07	3.68
8801.93	1.13	7096.12	3.41	4879.36	2.04	8135.43	3.92
8813.59	1.13	7447.31	3.60	5501.39	2.37	8584.64	4.16
8821.22	1.13	7770.42	3.77	5812.40	2.66	9010.05	4.37
8825.36	1.13	8064.44	3.93	5976.58	2.76	9410.94	4.58
8826.36	1.13	8328.23	4.07	5976.58	2.86	9786.52	4.77
8824.50	1.13	8560.56	4.19	6917.78	3.40	10135.94	4.95
8819.91	1.13	8760.02	4.29	7047.28	3.74	10458.26	5.11
				7590.80	4.02		
				7953.82	4.30		
				7974.21	4.44		
				8213.84	4.60		

Gráfico 10. Fuerza-Deflexión de viga doblemente reforzado.



Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 24. Tabla de fuerza deflexión de las vigas reforzadas.

ESFUERZO DEL CONCRETO	VIGA CON ACERO (BASE)		VIGA CON GFRP				VIGA CON GFRP-ACERO			
	FUERZA (Tn)	DEFLEXION (cm)	FUERZA (Tn)	DEFLEXION (cm)	% Var. Fuerza	% Var. Deflexión	FUERZA (Tn)	DEFLEXION (cm)	% Var. Fuerza	% Var. Deflexión
Antes de fisuración	1.553	0.14	1.209	0.09	-22%	-36%	1.268	0.1	-18%	-29%
Después de fisuración	2.287	0.26	0.914	0.04	-60%	-85%	1.04	0.06	-55%	-77%
Momento de Servicio	6.113	0.79	5.883	2.74	-4%	247%	6.651	3.14	9%	297%
Inicio de fluencia	8.472	1.08	-	-	-	-	-	-	-	-
Falla del elemento	8.82	1.13	8.76	4.29	-1%	280%	10.458	5.11	19%	352%

Fuente: Elaboración propia (2018).

En la tabla 24 podemos observar que la deflexión de las vigas reforzadas con GFRP con respecto a las de acero, disminuyen solo hasta instantes después de la fisuración del elemento, para luego incrementarse de manera muy significativa hasta llegar a la falla del

elemento. Así mismo la fuerza aplicada no deja de incrementarse de manera progresiva, soportando mayor carga las vigas reforzadas con GFRP en tensión y acero en compresión.

4.1.4 Análisis de costo.

Cotización de varillas GFRP

Las varillas de GFRP, son fabricados en diferentes lugares del mundo. Sobre todo, en países desarrollados. Se mando correos para que nos puedan enviar la cotización de diferentes dimensiones de varillas de acero, solo respondiendo al correo la empresa FIVICOR de España y Shanxi Xin Shi Yu Commercial And Trade Co. De China

Para comparar los precios con el acero, hallaremos un precio promedio en soles por kilogramo.

Tabla 25. Precios de las varillas de GFRP en España.

Empresa	País de Procedencia	Diámetro (mm)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	Peso (kg/M.L)	Precio	Precio (S/. /Kg)
FIVICOR	España	6	1953	2.83E-05	0.055 1	0.60 € 10.87 €	41.51
		8	1953	5.03E-05	0.098 1	0.90 € 9.17 €	35.02
		10	1953	7.85E-05	0.153 1	1.50 € 9.78 €	37.35
		12	1953	11.3E-05	0.221 1	2.20 € 9.96 €	38.04
		20	1953	31.4E-05	0.614 1	5.60 € 9.13 €	34.87
Fuente: elaboración propia (2018)					PRECIO PROM. (S/.)		37.36

Tabla 26. Precios de las varillas de GFRP en Shanxi Xin Shi Yu.

Empresa	País de Procedencia	Diámetro (mm)	Peso (kg/M.L)	Precio	Precio (S/. /Kg)
CHINA	Shanxi Xin Shi Yu Commercial And Trade Co.	8	0.100 1	\$0.65 \$6.50	24.96
		10	0.150 1	\$0.90 \$6.00	23.04
		12	0.210 1	\$1.19 \$5.67	21.76
		14	0.275 1	\$1.69 \$6.15	23.60
		16	0.390 1	\$2.10 \$5.38	20.68
		18	0.490 1	\$2.44 \$4.98	19.12
		20	0.570 1	\$3.02 \$5.30	20.35
		22	0.700 1	\$3.88 \$5.54	21.28
		24	0.900 1	\$4.56 \$5.07	19.46
		26	1.060 1	\$4.56 \$4.30	16.52
Fuente: elaboración propia (2018)			PRECIO PROM. (S/.)	21.08	

El costo del producto de las varillas GFRP en China es más barato que en otra parte del mundo. Siendo el precio promedio por Kilogramo de S/. 21.08

Cotización de Flete Marítimo

Al encontrarse el precio más económico en china, buscó información sobre el flete marítimo, para establecer el costo de importación del producto, así tener un precio aproximado del precio total por Kg de las varillas de GFRP.

Tabla 27. Precio de flete marítimo.

FLETE MARITIMO				
EMPRESAS	COSTO (\$/KG)	COSTO (S/. /KG)	PUERTO DE EMBARQUE	PUERTO DE DESEMBARQUE
Guangzhou Hongdex International Logistics Co., Ltd.	0.07	0.23	Hong Kong/Guangdong	Callao
Shenzhen Valor Global Logistics Company Limited	0.05	0.17	Shanghai/Beijin	Callao
Shenzhen Hermes Int 1 Forwarding Ltd.	0.06	0.21	Shenzhen/Guangzhou	Callao

Fuente: Hinostraza Yucra, Johan James

De la figura 27 determinamos que el costo del flete marítimo de las GFRP, nos resultaría s/. 0.17 por Kg.

El precio total de las varillas de **GFRP** nos resulta **S/. 21.25** por **Kg**. Mientras tanto el costo de las varillas de **acero** en el mercado peruano tiene un costo de **S/. 4.00** por **Kg**.

Con esto sé concluye que, en el mercado peruano el acero como material es más barato que las varillas de GFRP. Sin embargo, por las características mecánicas y químicas mostradas por las varillas de GFRP, no tendría costo por corrosión en comparación con el acero.

Tabla 28. Cotización de las varillas usadas en las vigas de nuestro análisis

	VIGA CON ACERO		VIGA CON GFRP		VIGA CON GFRP-ACERO	
	Acero Ø5/8"	GFRP 16mm	Acero Ø5/8"	GFRP 16mm	Acero Ø5/8"	GFRP 16mm
Longitud (m)	3.7	0.00	0.00	3.7	3.7	3.7
N°de barras	6	0	0	6	2	4
Long. total (m)	22.2	0.00	0.00	22.2	7.4	14.8
Peso total (kg)	34.45	0.00	0.00	8.61	11.48	5.74
Costo (s/. / kg)	4	21.25	4	21.25	4	21.25
Costo Total	S/ 137.82		S/ 183.04		S/ 167.97	

Fuente: elaboración propia (2018)

El costo de los refuerzos GFRP de las vigas con respecto al acero, tienen un incremento del 33% si son remplazados en tensión y compresión, y del 22% si solo es remplazado en tensión.

Considerando el costo de traslado de material de almacén a obra, así mismo el mantenimiento de los refuerzos de acero por corrosión. Las varillas GFRP llegaría a tener un costo muy inferior a la del acero

4.2 PRUEBA DE HIPÓTESIS

En esta sección del trabajo el investigador coteja los resultados de la investigación con las hipótesis que se había planteado en un principio. Partiendo de esta premisa se tiene que la primera hipótesis referida a responder la probabilidad de que las vigas reforzadas con varillas de vidrio con la ductilidad como indicador tendrán mejor comportamiento estructural en flexión frente a las vigas reforzadas con acero convencional. Los resultados muestran que las varillas de GFRP puede ser usado en zapatas armadas, vigas reforzadas de cimentación y otros elementos que no estén sujetos y/o estén controlados por su ductilidad y la deflexión.

En segundo lugar, se tiene es probable que el esfuerzo de compresión y tensión del concreto en vigas reforzadas con varillas de vidrio y las reforzadas con acero convencional, muestre mejor comportamiento frente la viga reforzado con acero y GFRP. Esta hipótesis se rechaza debido a que existe suficiente evidencia teórica que indica que la falla la presenta el concreto.

Como tercer aspecto a considerar está la probabilidad que la deflexión de vigas reforzadas con varillas de vidrio y las reforzadas con acero convencional, muestren mejor comportamiento que la viga reforzado con acero y GFRP. Esta hipótesis se rechaza en función de los resultados.

Finalmente, se tiene que los costos de cotización y traslado de las varillas GFRP, permitirán su incorporación en la construcción de obras en Perú. Después de realizar una investigación que incluye los lugares de exportación más accesibles, el traslado y el costo, se tiene que la varilla GFRP. Se determinó que el acero es el material de menor costo al compararlo con la varilla GFRP; sin embargo, al evaluar la inversión a mediano y largo plazo puede entenderse que las características mecánicas y químicas ahorrarían costo en mantenimiento, motivado a que este material no presenta corrosión.

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la discusión de resultados el investigador compara los resultados de otras investigaciones, con la teoría y sus propios hallazgos investigativos, a continuación, se mencionan algunos:

En relación al tema Escamilla y Loza (2004), en su tesis titulada: Estado del Arte en Varillas Corrugadas de Fibra de Vidrio “GFRP” Para Refuerzo en Elementos de Concreto. Dentro de sus conclusiones señalan que queda en claro que las varillas GFRP hasta el momento, son de uso recomendable en casos muy específicos en los cuales el refuerzo con varillas de acero tradicional afecte el funcionamiento del elemento estructural o inmueble en cuestión, o que debido a los factores ambientales el refuerzo con acero no tenga la vida útil necesaria. En este estudio también se determinó que estas varillas deben ser utilizada en casos y condiciones específicas.

Aspecto importante lo señala Lalvay (2017), en su tesis titulada: Análisis, Comportamiento y Comparación de Varillas Corrugadas en Fibra de Vidrio, con Relación a las Varillas convencionales; Conjuntamente en Elementos Estructurales de Hormigón. Sus resultados muestran que en el ensayo a compresión se estableció el esfuerzo a la compresión con la respectiva deformación; dando como resultado que la varilla de fibra de vidrio presenta una curva esfuerzo deformación distinta a la del acero. Este resultado concuerda con lo encontrados en esta investigación, motivado a las diferencias notorias entre las varillas de Corrugadas en Fibra de Vidrio y las convencionales.

De igual forma Escamilla y Loza (2004), plantean que se debe poner especial cuidado en el diseño de elementos, ya que se realiza por falla del concreto lo cual implicaría falla del tipo frágil. Los factores de seguridad en el diseño con varillas GFRP son mayores que en el diseño con acero. Las apreciaciones finales de esta investigación permiten está en concordancia con estos autores.

Enfatizando las ventajas que tiene la varillas GFRP Escamilla y Loza (2004), menciona que entre ellas se encuentra su resistencia a la corrosión producida, “también es resistente a los ataques químicos, su transparencia a las ondas electromagnéticas, baja conductividad tanto eléctrica como térmica y por último su ligereza lo cual implica una mayor manejabilidad en obra” (p.4). estos resultados coinciden al hablar de costos a largo plazo en la utilización de estas varillas en obras de construcción en Perú.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

Después de obtener los resultados el investigador tiene un conocimiento más profundo de la realidad problema estudiada, en este caso en particular se señalan a continuación algunas apreciaciones finales:

- Se puede mencionar que al observar y analizar el **grafico N°04 y la tabla 17**, se puede concluir que, en las dos vigas reforzadas con GFRP en tensión, el elemento falla por rotura del concreto más no por ruptura de las barras de GFRP. Entonces se cumple la relación $\text{cuantía} / \text{cuantía balanceada} > 1$, la falla se da por rotura del concreto.

Asimismo, las fórmulas estudiadas para el análisis de flexión en viga reforzadas con acero, al ser usadas para las vigas reforzadas con otro elemento como las varillas GFRP, brinda resultados de momentos internos teóricos muy aproximados a lo experimental realizado por Almerich (2010).

- Se ha determinado, según la **tabla N°18**, que la ductilidad de las vigas reforzadas en tensión con GFRP (\varnothing 16mm), no experimentan el momento de fluencia, por lo tanto, no es posible hallar la ductilidad de manera directa en el diagrama de momento curvatura. Por esta razón es necesario el uso de otra filosofía de diseño de vigas con varillas de GFRP.

- Se ha determinado según la **tabla N°19** y tomando el momento de servicio como referencia, el esfuerzo a compresión del concreto en la viga N°01, N°02 y N°03 es de 20.53Tn, 21.35Tn y 19.40Tn respectivamente, teniendo la viga N°02 y N°03 una variación de 4% y -6% con respecto a la viga N°01.

Así mismo, se ha determinado según la **tabla N°19** y tomando el momento de servicio como referencia, el esfuerzo a tensión del concreto en la viga N°01, N°02 y N°03 es de 0.76Tn,

0.20Tn y 0.18Tn respectivamente, teniendo la viga N°02 y N°03 una variación de -74% y -76% con respecto a la viga N°01.

Por lo tanto, la viga N°03 es quien soporta mayor carga, por tener el menor esfuerzo de compresión y tensión del concreto.

- Se ha determinado según la **tabla N°23** y el **grafico N°10**, que las deflexiones producidas por una misma carga en las vigas N°02 y N°03, con respecto a la viga N°01 tienen un incremento del 300% aprox. Esto nos permite concluir que un diseño de viga con GFRP, el criterio de deflexión es más importante que la resistencia.

De acuerdo al **grafico N°10**, los resultados de la deflexión por la ecuación de Branson y los resultados experimentales realizado por Almerich (2010), en una viga doblemente reforzado con GFRP, son de muy próximos entre sí, por lo tanto, se da como valido el diseño y el análisis de deflexión realizados en la presente tesis.

- Se ha determinado según la **tabla N°28**, que los refuerzos de las vigas N°01, N°02 y N°03 tienen un costo de **S/. 137.82, S/. 183.04 y S/. 167.97** respectivamente, esto significa un incremento de costo del refuerzo de las vigas N°02 y N°03 en un **33% y 22%** con respecto a la viga N°01. Sin embargo, si tomamos en cuenta el costo de mantenimiento de los refuerzos en un ambiente agresivo como el salitre, podría ser más barato usar las varillas GFRP por su inmunidad a la corrosión.

CAPÍTULO VII. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones permiten al investigador plantear una serie de sugerencias que pueden en gran medida ayudar a afrontar la problemática abordada, a continuación, se menciona algunas:

- Se propone realizar ensayos experimentales empleando como refuerzo de tensión varillas de GFRP o intercaladas con acero de diferentes diámetros, teniendo como patrón una viga reforzada netamente con acero, manteniendo una misma cuantía.
- No es recomendable usar las varillas GFRP como refuerzo a compresión en vigas.
- Se propone hacer estudios analíticos y experimentales de corte de vigas reforzadas con GFRP para entender la forma de falla.
- Se propone estudiar de manera analítico y experimental de columnas con refuerzos de GFRP y compararlos con los del acero.
- El uso de varillas GFRP se puede emplear en muros de contención, ya que solo se analizan las cargas laterales de empuje y no requiere ductilidad.
- El uso de varillas de GFRP puede ser usado en zapatas armadas, vigas reforzadas de cimentación y otros elementos que no estén sujetos y/o estén controlados por su ductilidad y la deflexión.

CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS

- Aceros Arequipa. (2018). *Procesos de producción*. Obtenido de [//www.acerosarequipa.com/procesos-de-produccion.html](http://www.acerosarequipa.com/procesos-de-produccion.html)
- Allauca Pancho , F. R. (2011). *Influencia de la microestructura sobre las propiedades mecánicas en varillas de acero*. (Tesis). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Almada N, D., Bárcena A, J. N., & Enciso T, M. (2015). *Determinación y Análisis de la gráfica Momento - Curvatura de diferentes secciones de vigas de concreto reforzado*. (Tesis). Obtenido de <http://www.laccei.org/LACCEI2016-SanJose/RefereedPapers/RP228.pdf>
- Almerich Chulia, A. I. (2010). *Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP*. (Tesis Doctoral). Universidad Pontificia de Valencia.
- Amador Núñez, M. A. (2017). Obtenido de *Diseño a flexión de vigas de concreto armadas con refuerzo combinado de acero y PRFV (refuerzo híbrido)*. La Habana - Cuba. (Tesis): Universidad Tecnológica de la Habana.
- American Concrete Institute. ACI 440.1R-15. (2015). *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*. Obtenido de https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=440115&Format=DOWNLOAD&Language=English&Units=US_AND_METRIC
- Arango Córdoba, S., & Zapata Sierra, J. A. (2013). *Influencia de la fibra de vidrio en las propiedades mecánicas de mezclas de concreto*. (Tesis). Universidad EAFIT.
- Carrasco Díaz, S. (2017). *Metodología de l investigación*. Lima - Perú: San Marcos.

- Escamilla Hernández, L. A., & Loza Vega, J. Ó. (2004). *Estado del Arte en Varillas Corrugadas de Fibra de Vidrio "GFRP" Para Refuerzo en Elementos de Concreto*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Obtenido de XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural México: http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_13/te_02/ar_16.pdf
- Fernández Cánovas, M. (2012). Teoría y experiencias en el incremento de ductilidad de los hormigones de alta resistencia reforzados con fibras de acero. *Revista ALCONPAT*, Vol 2, (3) , 131 - 148.
- González Cuevas , O. M., & Robles Fernández, F. (2005). *Aspectos fundamnetales del concreto reforzado*. México: Limusa.
- Harmsen , T. E. (s.f.). *Diseño de estructuras de concreto armado*. . Universidad Católica del Perú: Fondo editorial 2002.
- Lalvay Llivigañay, B. H. (2017). *Análisis, Comportamiento y Comparación de Varillas Corrugadas en Fibra de Vidrio, con Relación a las Varillas convencionales; Conjuntamente en Elementos Estructurales de Hormigón*. (Tesis). Universidad de Azuay.
- Maher , A., Mohamed , S., Ahmed , M., & Ali , S. (2014). *Comportamiento de flexión analítica y experimental de vigas de hormigón reforzado con barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio*. (Tesis). Bologna- Italia. Alma Mater Studiorum - Università.
- Martínaz , J. J., Wainshtok Rivas, H. R., & Córdova , L. (2016). Obtenido de Díaz, Pérez, C Diseño de viga continua de concreto armada con barras de polímeros reforzados con fibras de vidrio (PRFV). Convención Científica de Ingeniería y arquitectura. (Tesis): <https://www.researchgate.net/publ>

- Pino Tarragó, J. C., Beltrán Reyna, R. F., & Terán Herrera, H. C. (2015). *Resistencia de Materiales; Teoría y Calculos prácticos*. Ecuador: Universidad de las fuerzas armadas - ESPE.
- Quiroz torres, L. G. (2015). *Diseño sísmico de estructuras de concreto reforzado (ISR-04)*.
Obtenido de <http://www.academia.edu/9723457/>
- Rivadeneira Benítez, G. F. (2016). *Correlación entre vigas de concreto armadas con varillas de acero y con varillas de fibra reforzada con polímero FRP sometidas a esfuerzos de flexión en los tercios del claro. (Tesis)*. Universidad Central del Ecuador.
- Vidaud, E., & Vidaud, I. N. (2014). Obtenido de Polímeros Fibroreforzados. Una alternativa sustentable frente al ataque de la corrosión en el concreto armado.:
[//www.revistacyt.com.mx/pdf/diciembre2014/tecnologia.pdf](http://www.revistacyt.com.mx/pdf/diciembre2014/tecnologia.pdf)

CAPÍTULO IX. ANEXO

Anexo 1. Matriz de consistencia.

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variables	Indicadores
<p>– ¿Cuál será el análisis comparativo del comportamiento estructural en flexión, entre vigas reforzadas con varillas de vidrio frente a las reforzadas con acero?</p>	<p>– Desarrollar un análisis comparativo del comportamiento estructural en flexión, entre vigas reforzadas con varillas de vidrio frente a las reforzadas con acero.</p>	<p>– Es probable que un análisis comparativo del comportamiento estructural en flexión entre vigas reforzadas con varillas de vidrio frente a las reforzadas con acero convencional, permita la demostración ambas vigas.</p>	<p>Variable Independiente</p> <p>Vigas reforzadas con varillas de vidrio.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Flexión • Elasticidad • Varilla de acero (Ø5/8”) y GFRP (Ø16mm) • Resistencia Ultima • Deformación unitaria del concreto • Esf. de ruptura del concreto
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas		
<p>– ¿De qué manera las vigas reforzadas con varillas de vidrio en relación a la ductilidad, tendrán mejor comportamiento estructural en flexión frente a las vigas reforzadas con acero convencional?</p> <p>– ¿Cuál será el esfuerzo de compresión y tensión del concreto en vigas reforzadas con varillas de vidrio y las reforzadas con acero convencional, frente la viga reforzado con acero y GFRP?</p> <p>– ¿Cuál será la deflexión de vigas reforzadas con varillas de vidrio y las reforzadas con acero convencional, frente la viga reforzado con acero y GFRP?</p> <p>– ¿Cuáles serán los costos estimados de cotización y traslado de varillas GFRP, para su incorporación en las obras de construcción?</p>	<p>– Determinar de qué manera las vigas reforzadas con varillas de vidrio en relación a la ductilidad, tendrán mejor comportamiento estructural en flexión frente a las vigas reforzadas con acero convencional.</p> <p>– Determinar el esfuerzo de compresión y tensión del concreto en vigas reforzadas con varillas de vidrio y las reforzadas con acero convencional, frente la viga reforzado con acero y GFRP.</p> <p>– Determinar la deflexión de vigas reforzadas con varillas de vidrio y las reforzadas con acero convencional, frente la viga reforzado con acero y GFRP.</p> <p>– Estimar los costos estimados de cotización y traslado de varillas GFRP, para su incorporación en la construcción de obras en Perú.</p>	<p>– Es probable las vigas reforzadas con varillas de vidrio con la ductilidad como indicador tendrán mejor comportamiento estructural en flexión frente a las vigas reforzadas con acero convencional.</p> <p>– Es probable que el esfuerzo de compresión y tensión del concreto en vigas reforzadas con varillas de vidrio y las reforzadas con acero convencional, muestre mejor comportamiento frente la viga reforzado con acero y GFRP.</p> <p>– Es probable la deflexión de vigas reforzadas con varillas de vidrio y las reforzadas con acero convencional, muestren mejor comportamiento que la viga reforzado con acero y GFRP.</p> <p>– Los costos de cotización y traslado de las varillas GFRP, permitirán su incorporación en la construcción de obras en Perú.</p>	<p>Vigas reforzadas con acero convencional.</p> <p>Variable Dependiente</p> <p>Comportamiento estructural en flexión</p>	<p>– Ductilidad</p> <p>– Esfuerzo a compresión y tensión del concreto.</p> <p>– Deflexión</p> <p>– Costos</p>

Fuente: Elaboración propia (2018).